

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

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

ТРУДЫ

06
Т78

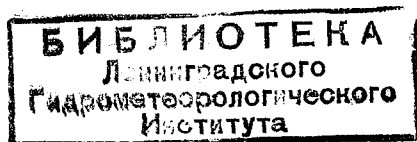
ВЫПУСК 311

В. Г. ГЛУХОВ

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ
ОБРАЗОВАНИЯ ГОЛОЛЕДА
НА ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

опт. 07

Под ред. д-ра геогр. наук М. В. ЗАВАРИНОЙ



ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ

ЛЕНИНГРАД • 1972

В монографии, выполненной на материале шестилетних измерений гололедно-изморозевых отложений на обнинской мачте, рассматриваются вертикальное распределение отложений, режим ветра и облачности в периоды гололедообразования в нижнем 300-метровом слое атмосферы.

Анализируется влияние скорости ветра, водности облаков и температуры воздуха на интенсивность нарастания отложений и их плотность, дается методика расчета интенсивности обледенения высотных сооружений по данным аэрологических наблюдений над облачностью. Приводятся результаты опытных расчетов гололедно-ветровых нагрузок для элементов сооружений, дается оценка динамической компоненты гололедно-ветровой нагрузки.

Монография предназначена для метеорологов, климатологов и инженеров, занимающихся вопросами проектирования высотных сооружений. Может быть полезна для студентов и аспирантов гидрометеорологических специальностей.

ВВЕДЕНИЕ

В Советском Союзе ежегодно вводятся в эксплуатацию десятки тысяч километров линий электропередачи (ЛЭП), связи (ЛС), непрерывно растет протяженность электрифицированных железных дорог, интенсивно ведется строительство высотных сооружений.

Для ЛЭП и ЛС, а также высотных конструкций особое значение имеет правильный выбор внешних расчетных нагрузок (в первую очередь гололедных и ветровых). Эти нагрузки в значительной мере определяют конструктивные параметры и условия будущей эксплуатации сооружений.

Следует заметить, что отложения, образующиеся на опорах линий электропередачи и связи, не оказывают заметного влияния на работу последних. Вес отложений, образующихся на проводах казаных линий, часто во много раз превышает собственный вес провода, и, поскольку длина пролета (расстояние между опорами) для высоковольтных ЛЭП составляет несколько десятков метров, значительные отложения на проводах могут привести не только к обрыву проводов, но и к разрушению опор.

С целью уменьшения ветровой нагрузки высотные сооружения в ряде случаев выполняются в виде ажурных конструкций, сравнительно легко продуваемых ветром. В то же время такие сооружения должны иметь больший диаметр для обеспечения прочности, что утяжеляет и делает их дорогостоящими.

При обледенении сооружений такого типа их ажурная или решетчатая поверхность покрывается сплошной коркой льда, в результате чего резко ухудшается продуваемость сооружения и увеличивается действующая на него ветровая нагрузка.

Другой тип высотных сооружений — полые цилиндрические мачты, укрепленные тросами (вантами). Для таких конструкций существенное значение имеют отложения, образующиеся на вантах (тросах), причем чем меньше диаметр корпуса мачты, тем большую опасность представляет обледенение поддерживающих ее тросов.

Наиболее сильному обледенению подвергается, как правило, верхняя часть высотных сооружений, закрытая облаками нижнего яруса. Это приводит к изменению периода собственных колебаний сооружения.

Недооценка гололедных нагрузок как на провода ЛЭП и ЛС так и на высотные сооружения приводит к тяжелым авариям, причиняющим значительный материальный ущерб. Интенсивное строительство ЛЭП и ЛС дало первый толчок исследованиям гололедно-изморозевых явлений с целью учета последних в строительной практике.

В 30—40-е годы появляются исследования по гололедно-изморозевым явлениям В. В. Бургсдорфа, Н. С. Муретова, К. Г. Абрамович, С. Б. Гапонова и др. В эти же годы П. А. Воронцовым, Е. С. Селезневой, П. А. Молчановым, М. В. Завариной были выполнены работы, посвященные проблеме обледенения самолетов. Эти работы и сейчас представляют большую ценность для изучения условий образования отложений на стационарных объектах (ЛЭП и ЛС, высотные сооружения).

В послевоенные годы развиваются исследования по физике гололедообразования (А. А. Дмитриев, Ю. Н. Андреев, В. В. Базилевич и др.). Накопившийся к этому времени материал наблюдений позволил приступить к предварительному районированию территории СССР по гололедным нагрузкам. Первый, весьма несовершенный вариант районирования был опубликован в 1954 г. в «Правилах устройства электроустановок»; в 1960 г. он был уточнен. На основании этого районирования Всесоюзный научно-исследовательский институт электроэнергетики и Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова (ГГО) совместно с рядом других организаций выполнили детальное районирование территории СССР по нормативной толщине стенки гололеда.

В эти годы изучение гололедно-изморозевых явлений ведется широким фронтом. А. Н. Раевский разработал принципы районирования по гололеду с учетом форм рельефа, В. Е. Бучинский составил ценный атлас гололедно-изморозевых отложений, наблюдавшихся на проводах ЛЭП. Значительные исследования по гололеду проводятся в ГГО М. В. Завариной, А. В. Рудневой, Ц. А. Швер, И. И. Соломатиной предложена расчетная формула для определения диаметра обледенелого провода на высотах до 25 м по наземным данным.

В связи с растущим строительством высотных сооружений возникает необходимость исследования гололедно-изморозевых явлений в нижних слоях атмосферы, до высоты нескольких сот метров.

В 1963 г. под руководством Ф. Я. Клинова были организованы систематические наблюдения над гололедом на высотной мачте Института экспериментальной метеорологии в Обнинске, а в 1970 г. — на станкинской телевизионной башне в Москве. Эти сооружения представляют собой уникальные стационарные лаборатории для исследования процессов, протекающих в нижнем 300-метровом слое атмосферы.

Наблюдения над гололедом на указанных мачтах сопровождаются измерениями метеозадач элементов во всем рассматриваемом слое.

Группы метеорологов на обнинской и останкинской мачтах занимаются исследованиями процессов роста и испарения отложений, изучают микроструктуру и образование последних на предметах различной конфигурации, производят фотометрические исследования различных видов отложений.

В данной работе, выполненной на материале наблюдений на обнинской мачте, рассматривается генезис гололедно-изморозевых образований в нижних слоях атмосферы, оценивается интенсивность образования отложений на разных высотах, исследуется режим основных метеорологических элементов в период гололедообразования и влияние метеорологических факторов на процессы образования отложений, излагается методика расчета гололедных нагрузок на высотные сооружения по данным аэрологических наблюдений над облачностью и дается опытный расчет гололедно-ветровых нагрузок.

Для правильного учета влияния гололедно-изморозевых образований на высотные конструкции крайне важно решить эти вопросы.

Глава I. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В НИЖНЕМ 300-МЕТРОВОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

§ 1. Характеристика материала наблюдений

Достаточно подробные описания обнинской мачты и установленных на ней приборов, а также детальная характеристика местоположения мачты даны в работах [42, 43, 68]. Поэтому ограничимся кратким описанием мачты и особенностей ее местоположения.

Высотная мачта Института экспериментальной метеорологии представляет собой стальную трубу высотой 310 м с постоянным по всей длине диаметром, равным 2,4 м. Однако за счет выдвижной вертикальной рейки измерения можно производить до высоты 315 м.

Корпус башни укреплен четырьмя ярусами стальных тросов.

На уровне 310 м располагается верхняя площадка для наблюдений. Кроме того, имеется 13 рабочих площадок (балконов), опоясывающих мачту и расположенных на высотах 25, 48, 73, 97, 121, 145, 169, 193, 217, 241, 265, 289, 301 м.

Каждый из балконов имеет восьмиугольную форму и окружен перилами, которые сварены из стальных стержней диаметром 15 мм.

С балконов выдвигаются на запад, север, восток и юг рейки длиной 6 м, на концах которых устанавливаются измерительные приборы — автоматические датчики температуры, давления и влажности воздуха, скорости и направления ветра, а также тензодатчики пульсаций ветра.

Высотная мачта установлена на поляне, которая с юга на расстоянии 300 м окружена лиственным лесом. На севере и востоке поляны и примыкающий к ней луг простираются на 1—2 км; далее начинается лесной массив. На западе поляны находится застраиваемый участок и далее, на расстоянии 1—1,5 км, — лес.

Особенности местности вблизи мачты обуславливают известную макрошероховатость и термическую неоднородность около мачты.

Наблюдения над гололедно-изморозевыми отложениями в периоды образования последних на мачте проводятся два раза в сутки (в 10 и 15 час.) на высотах 8, 25, 73, 121, 169, 217, 265 и 301 м.

Измерения производятся на наветренной стороне рабочих площадок мачты, на стандартных горизонтальных стержнях перил, имеющих одинаковый на всех балконах диаметр — 15 мм. Необходимость измерять отложения именно на наветренной стороне балконов вызвана тем, что цилиндрический корпус мачты существенно искажает как скорость, так и направление ветра. Теоретические расчеты А. А. Дмитриева [42] показали, что на подветренной стороне мачты на расстоянии 3,1 м от ее оси, что соответствует месту крепления перил, скорость ветра занижается на 80—100%.

Указанные расчеты были подтверждены экспериментальной проверкой, результаты которой изложены в [42, 43]. Естественно, что в периоды гололедно-изморозевых явлений влагонесущий поток, обтекающий мачту, на подветренной стороне последней будет существенно ослаблен.

В работах [42, 43] было также показано, что вследствие обтекания мачты потоком скорость и направление его на боковых сторонах балкона значительно искажаются. Следовательно, наиболее репрезентативной для наблюдений над отложениями является именно наветренная сторона рабочей площадки.

В сроки наблюдений над гололедом (10 и 15 час.) с помощью ручного анемометра Фусса определяется скорость ветра в м/сек. у места снятия пробы отложения. Во время снятия пробы отложения с помощью соответствующих датчиков определяются давление, влажность и температура воздуха на высотах 2 и 301 м. Визуально определяются количество и форма облачности. Нижняя граница облаков определяется как визуально (по степени закрытия рабочих площадок мачты), так и инструментально, с помощью прибора типа ИВО.

Эпизодически (в периоды интенсивного гололедообразования) измеряется вес отложений, образующихся на вертикально ориентированных элементах мачты (тросах, реях).

Таким образом, наблюдения над гололедом и изморозью на обнинской мачте сопровождаются достаточно надежными измерениями целого комплекса метеорологических элементов, что весьма важно для исследования зависимости процессов гололедообразования от метеоусловий.

Нами были использованы данные наблюдений над гололедом, проводившихся на обнинской мачте в сезоны 1963-64, 1964-65, 1965-66, 1966-67, 1967-68 и 1968-69 гг. За это время отмечено 102 пе-

иода с различными видами отложений и 912 случаев нарастания отложений во всем слое 8—301 м; проведено 1493 наблюдения, из которых в работе использовались 1342, так как в 151 случае наблюдались отложения диаметром менее 5 мм, так называемые следы. Ниже дано общее число наблюдений по высотам за 1963—1968 гг.:

ысота (м)	8	25	73	121	169	217	265	301
исло наблюдений	21	40	126	151	210	307	320	318

В 633 случаях наблюдалась зернистая изморозь, в 396 — смесь, 237 — гололед и в 227 — кристаллическая изморозь.

§ 2. Методика расчета толщины стенки гололеда

Нагрузки от гололеда или изморози, действующие на провода [ЭП, ЛС и различные элементы высоких сооружений, рассчитывают по толщине стенки (b) цилиндрического гололеда с объемным весом $0,9 \text{ г/см}^3$, равномерно охватывающего провод. В этом случае, согласно [94], вес отложения, рассчитанный на 1 м провода, определяется формулой

$$P = \pi \mu b(d + b) \text{ г/м}, \quad (1)$$

где μ — плотность отложения (г/см^3), d — диаметр провода (мм), b — толщина стенки гололеда (мм).

Принимая $\mu = 0,9 \text{ г/см}^3$, из формулы (1) получаем толщину стенки гололеда:

$$b = \sqrt{\frac{P}{283} + \frac{d^2}{4}} - \frac{d}{2}. \quad (2)$$

В действительности отложения имеют несимметричную форму, близкую к эллиптической, поэтому измеряют большой a и малый c диаметры. Зная диаметры отложения и его плотность, вес отложения можно определить по формуле

$$P = \pi \mu' \left(\frac{ac}{4} - \frac{d^2}{4} \right). \quad (3)$$

Таким образом, если вес отложения не измеряется, но известны большой и малый диаметры, то, подставляя (3) в (2), получаем выражение для определения b через диаметры:

$$b = \frac{\sqrt{(ac - d^2) \frac{\mu'}{\mu}} + d^2 - d}{2}, \quad (4)$$

где $\mu = 0,9 \text{ г/см}^3$.

Для расчета b по формуле (4) в ряде случаев необходимо знать отношение между большим и малым диаметрами отложения (либо среднее, если оно устойчиво, либо преобладающее), так как в некоторых станциях в первые годы наблюдений измерялся только большой диаметр.

В. В. Бургсдорфом, Н. С. Муретовым [17] и А. В. Рудневой [8] было установлено, что отношение $\frac{c}{a}$ меняется в зависимости от физико-географических условий района и особенностей самого процесса образования гололеда или изморози.

На основании указанных работ было принято $\frac{c}{a} = 0,6$ для гололеда и $\frac{c}{a} = 0,75$ для зернистой изморози и смеси. Среднее значение $\frac{c}{a}$ для зернистой изморози и смеси, полученное М. В. Заварной и Ц. А. Швер [49], также составляет 0,75.

В. В. Бургсдорф, Н. С. Муретов [17] и А. В. Руднева [86] экспериментически определили средние значения μ' , которые и используются для расчетов b по формуле (4):

для гололеда $\mu' = 0,75 \text{ г/см}^3$,

для смеси и мокрого снега $\mu' = 0,2 \text{ г/см}^3$,

для зернистой изморози $\mu' = 0,1 \text{ г/см}^3$,

для кристаллической изморози $\mu' = 0,05 \text{ г/см}^3$.

Плотность отложений, образующихся на высотных сооружениях, до настоящего времени не исследовалась.

Для расчета гололедных нагрузок на провода и опоры линии связи и электропередачи требуется знать величину нормативной толщины стенки гололедно-изморозевых отложений, наблюдаемых один раз в 5 и 10 лет, а для высоковольтных линий электропередачи — реже чем один раз в 10 лет.

Значения этих вероятностей определяются по формуле

$$\varphi(b) = \frac{m}{n+1} \cdot 100\%, \quad (4)$$

или

$$\varphi(b) = \frac{m - 0,3}{n + 0,4} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где n — число членов ряда (число наблюдений), m — порядковый номер членов ряда, расположенных в возрастающем порядке.

Для аппроксимации распределения вероятностей значений толщины стенки гололеда используется второй тип распределения максимальных значений величин Фишера — Типпта, выражаемый функцией

$$\varphi(b) = e^{-\left(\frac{b}{x}\right)^{-1}}. \quad (6)$$

Для расчета интегральных повторяемостей максимальных отложений гололеда построена номограмма с координатной сеткой $\lg b$ и $\lg \lg \left[\frac{1}{\varphi(b)} \right]$.

Точки b , $\varphi(b)$, нанесенные на эту номограмму в координатах $\lg \lg \left[\frac{1}{\varphi(b)} \right]$ и $\lg b$, укладываются на прямую линию, с помощью

которой можно определить значения b заданной обеспеченности.

На сети гидрометеорологических станций СССР наблюдения над гололедом проводятся на высоте 2 м. Районирование территории СССР проведено по толщине стенки гололеда, возможной один раз в 5 и 10 лет на высоте 10 м над поверхностью Земли.

В последние годы появилась необходимость исследования процессов образования гололеда и изморози и распределения отложений в пограничном слое. Этот вопрос рассматривается в следующем параграфе.

3. Изменение с высотой характеристик гололедно-изморозевых отложений в нижних слоях атмосферы

За последние годы ввиду интенсивного строительства высотных сооружений особый интерес представляет исследование изменения с высотой характеристик гололедно-изморозевых отложений.

О. А. Дроздов и А. В. Руднева [46] рассматривали изменение высотой интенсивности отложений в приземном слое, до высоты 5 м.

И. И. Соломатиной [89] была предложена формула для расчета диаметра обледенелого провода на высотах до 50 м по наземным данным, которая выведена на основании теории размерности с учетом концентрации влаги в единице объема q , продолжительности нарастания отложения τ , скорости ветра u и диаметра провода d ,

$$D = D_0 \frac{u}{u_0} + d \left(\frac{u}{u_0} - 1 \right) + 0,08 \frac{h}{h_0} (D_0 - 2,15) d. \quad (7)$$

Здесь D и D_0 , u и u_0 — диаметры обледенелого провода и скорости ветра на высотах h и h_0 .

Однако основные параметры формулы (7) определены по данным немногочисленных наблюдений до высот 15—20 м, и формула учитывает только два фактора, влияющие на интенсивность процесса гололедообразования, — скорость ветра и диаметр провода.

По этой формуле А. В. Руднева [85], используя данные сетевых инструментальных наблюдений, вычислила возможные максимальные диаметры отложения гололеда на проводах, подвешенных на высотах до 25 м, на ЕТС.

Формула (7) является приближенной и применима для расчетов до высот не более 100 м, так как на больших высотах необходимо учитывать важнейший фактор, определяющий интенсивность отложений, — наличие облаков нижнего яруса.

В результате анализа материалов наблюдений над облаками нижнего яруса и данных о вероятности зон возможного обледенения самолетов в нижнем 500-метровом слое над территорией СССР было сделано допущение о возможности использования формулы (7) для расчетов толщины стенки гололеда на высотах 200—300 м в первом районе гололедности Азиатской части СССР. Первые данные наблюдений в Обнинске показали, что расчеты по формуле (7)

для остальной части территории СССР дают заниженные результаты.

На основании данных наблюдений, проведенных на обнинском мачте, значения толщины стенки гололеда, возможные один раз в 5 лет, на высотах 200, 300 и 400 м были приняты равными 35, 45 и 60 мм соответственно.

Ф. Я. Клиновым [67, 68] на материале, полученном на обнинской вышке, были исследованы микроструктура различных видов отложений и процессы их роста и испарения.

Таблица

Повторяемость различных видов отложений по слоям (%)

Слой (м)	Вид отложения			
	кристаллическая изморозь	гололед	зернистая изморозь	смесь
0—100	23	5	5	2
100—200	29	31	25	23
200—300	48	64	70	75
Число случаев	227	237	633	396

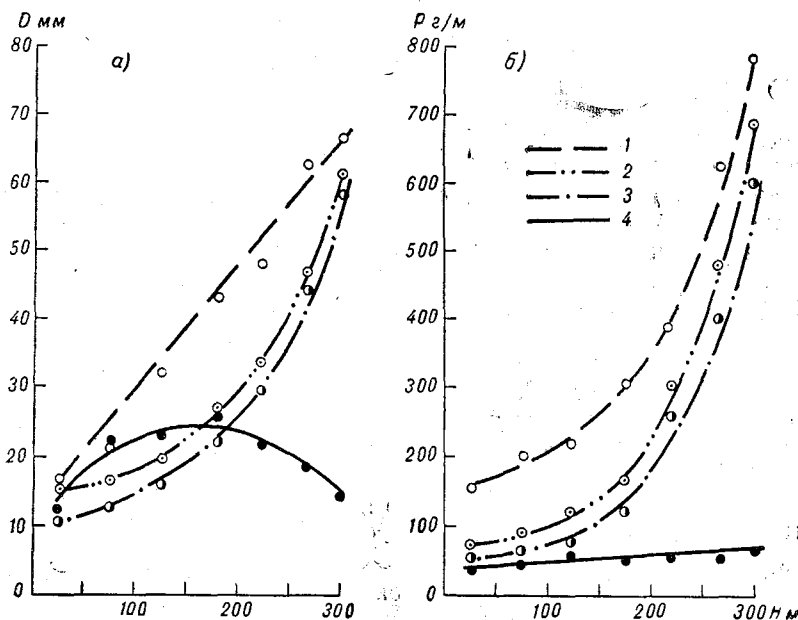


Рис. 1. Изменение с высотой средних значений большого диаметра (а) и веса (б) отложений.

1) смесь, 2) зернистая изморозь, 3) гололед, 4) кристаллическая изморозь.

Повторяемость различных видов отложений в слоях 0—100, 100—200 и 200—300 м дана в табл. 1.

Как видим, максимум повторяемости отложений наблюдается в слое 200—300 м. По-видимому, это объясняется тем, что именно в данном слое чаще всего располагается нижняя кромка облаков нижнего яруса, в которых создаются благоприятные для образования гололеда и изморози условия. Изменение с высотой средних значений большого диаметра $\bar{a}$ и веса $\bar{P}$ отложений дано на рис. 1. Средний диаметр кристаллической изморози (рис. 1 а) увеличивается с высотой лишь до уровня 100 м, далее он остается постоянным и в слое 200—300 м уменьшается. Вес кристаллической изморози (рис. 1 б), почти не меняется с высотой. Диаметр и вес других видов отложений увеличиваются с высотой, причем начиная с высоты 100 м значения $\bar{a}$ и $\bar{P}$ растут гораздо быстрее, чем в 100-метровом слое.

Распределение по высотам максимальных значений веса отложений (измеренных на стандартных горизонтальных стержнях) представлено в табл. 2.

Таблица 2

Годовые максимумы веса отложений (г/м)

Сезон	Высота (м)							
	2	25	73	121	169	217	265	301
1963-64	—	—	—	560	920	1120	1920	3370
1964-65	—	—	230	1120	1250	1150	2100	2980
1965-66	15	40	210	560	560	770	920	4420
1966-67	15	40	170	280	528	860	1230	2980
1967-68	—	—	220	220	350	700	840	1940
1968-69	—	—	70	410	840	1880	2400	3590

Весьма важно оценить величины гололедных нагрузок, действующих на элементы сооружений, ориентированные вертикально.

На обнинской мачте измерения отложений на вертикальных элементах производились эпизодически, в периоды интенсивного гололедообразования.

Всего за рассматриваемый период было проведено 9 таких наблюдений. В одном случае измерялась величина отложения на жестко закрепленном громоотводе диаметром 65 мм, ориентированном строго вертикально и установленном на высоте 314 м на самой верхней площадке мачты. В остальных случаях измерялась величина отложений на провисающих тросах диаметром 6—10 мм, расположенных под углом 70—80° к горизонтальной поверхности (уровни измерений — 265, 301 и 314 м). Во всех указанных случаях наблюдались отложения зернистой изморози.

Для сравнения приведем синхронно измеренные величины отложений на горизонтальных и вертикальных элементах мачты (табл. 3). В таблице, кроме веса и большого диаметра отложений,

Таблица 3

Характеристики синхронно измеренных отложений на вертикальных и горизонтальных элементах мачты
Зернистая изморозь

Дата	Срок (часы)	H м	Вертикальные элементы (тросы, громоотвод)				Горизонтальные элементы (перила)			
			d мм	P кг/м	a мм	b мм	d мм	P кг/м	a мм	b мм
4 I 1964 г.	10	301	6	10,35	220	52	15	1,92	140	20
28 XII 1965	15	301	6	4,10	132	31	15	1,54	85	17
30 XII 1965	10	301	6	6,40	114	40	15	2,20	90	21
30 XII 1965	10	314	65	10,88	155	56	15	2,20	90	21
6 I 1966	10	314	6	17,13	210	68	15	2,97	230	26
8 I 1966	10	301	6	11,19	145	55	15	2,54	110	23
7 I 1967	15	314	6	13,00	170	59	15	2,91	130	26
7 I 1967	15	301	6	6,67	120	41	15	2,91	130	26
13 XII 1968	10	265	10	2,20	150	21	15	0,42	45	7

даны значения толщины стенки гололеда b с объемным весом $0,9 \text{ г/см}^3$. Величина b рассчитана по весу отложения (формула (3)).

Поскольку в СНиП все нормативные величины толщины стенки гололеда даны для проводов, тросов и канатов, имеющих диаметр 10 мм, для сопоставления полученных величин b с нормативными, они были приведены к диаметру провода 10 мм, т. е. умножены на соответствующие поправочные коэффициенты, взятые из табл. 2, помещенной в работе [78].

Из табл. 3 видно, что отложения на вертикальных тросах и громоотводе превышают одновременно измеренные отложения на горизонтальных стержнях в 3—5 раз по весу и в 2—3 раза по толщине стенки гололеда.

На вертикальных элементах мачты за рассматриваемый период 5 раз наблюдались отложения весом более 10 кг/м, причем в одном случае вес отложения достигал 17,13 кг/м.

В настоящее время нормативная толщина стенки гололеда, возможная один раз в 5 лет, на уровне 300 м для большей части территории СССР принята равной 45 мм.

Если максимальное за шестилетний период отложение, наблюдавшееся на горизонтальном стержне на высоте 301 м, было меньше указанной нормы, то на вертикальных элементах на уров-

нях 301 и 314 м за этот же период 5 раз наблюдались отложения с толщиной стенки гололеда, превышающей нормативную величину.

Тот факт, что на вертикальных элементах образуются большие по величине отложения, чем на горизонтальных, объясняется, на наш взгляд, следующими причинами.

Направление ветра во время гололедообразования может изменяться весьма существенно. Вследствие этого влагонесущий поток оказывается направленным под разными углами к поверхности горизонтальных стержней (табл. 4), в то время как по отношению

Таблица 4

Направление ветра на уровне 301 м в сроки наблюдений над гололедом (10 и 15 час.) и угол между направлением ветра и поверхностью горизонтальных элементов

(период с 31 декабря 1966 г. по 7 января 1967 г.)

	31 XII		1 I		2 I		3 I		4 I		5 I		6 I		7 I	
	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15
Направление ветра (град.)	130	110	80	130	150	100	190	210	160	180	210	220	240	250	280	290
Угол	50	70	80	50	30	10	10	30	20	0	30	40	60	70	80	70

к вертикальным элементам влагонесущий поток всегда направлен под прямым углом.

Естественно, что интенсивность гололедообразования увеличивается с увеличением угла (до прямого) между направлением ветра и поверхностью объекта, подвергающегося обледенению, так как в этом случае увеличивается число капель, соприкасающихся с проводом в единицу времени. Кроме того, по данным Б. М. Беленького [10], объемный вес образовавшегося льда в этом случае также будет больше, поскольку с увеличением количества оседающей влаги увеличивается плотность отложения, на что указывает В. В. Бургсдорф [15]. По этой причине на вертикальных элементах сооружений образуются более плотные отложения, чем на горизонтальных.

Следует заметить, что определенную роль в увеличении плотности отложений на вертикальных элементах играет, по-видимому, некоторое «вращение» вектора влагонесущего потока вокруг указанных элементов мачты во время нарастания отложения, в результате чего отложение равномерно охватывает провод, приобретает круговую форму и весьма плотную структуру.

Если принять, что отложение имеет вид эллиптического цилиндра, его плотность можно рассчитать по формуле (2).

Так как малый диаметр отложения c при наблюдениях на обнинской мачте не измерялся, в расчетах использовалось среднее отношение $\frac{c}{a} = 0,75$, принимавшееся в качестве расчетного для

зернистой изморози и смеси В. В. Бургсдорфом и Н. С. Муретовым [17], А. В. Рудневой [86], М. В. Завариной и Ц. А. Швер [49]

В действительности в каждом конкретном случае величина $\frac{c}{a}$ отличалась от указанного среднего отношения. Следовательно, значения плотности рассчитаны с определенной погрешностью, относительную величину которой можно определить из формулы (2), задавая различные отношения $\frac{c}{a}$. Если $\delta = \frac{c}{a}$ — любое отношение диаметров, то

$$\mu_{\delta} = \frac{4P}{\pi(\delta a^2 - d^2)}, \quad (8)$$

где μ_{δ} — плотность отложения при $\frac{c}{a} = \delta$.

Для среднего отношения $\frac{c}{a} = 0,75$ получим

$$\mu_{0,75} = \frac{4P}{\pi(0,75a^2 - d^2)}. \quad (9)$$

Выражение для относительной погрешности определения плотности (r_{μ}) будет иметь следующий вид:

$$r_{\mu} = \frac{\mu_{\delta} - \mu_{0,75}}{\mu_{0,75}} = \frac{a^2(0,75 - \delta)}{\delta a^2 - d^2}. \quad (10)$$

Формула (10) показывает, что величина r_{μ} зависит не только от отношения $\frac{c}{a}$, но и от величины большого диаметра a .

Приведем результаты расчета относительной погрешности определения плотности зернистой изморози и смеси при различных значениях большого диаметра a и отношения $\frac{c}{a}$:

а) $50 \text{ мм} < a < 100 \text{ мм}$

$\frac{c}{a}$	1,00	0,90	0,80	0,75	0,70	0,60	0,50
$r_{\mu} \%$	-27	-19	-9	0	9	30	60

б) $100 \text{ мм} < a < 300 \text{ мм}$

$\frac{c}{a}$	1,00	0,90	0,80	0,75	0,70	0,60	0,50
$r_{\mu} \%$	-25	-17	-6	0	7	25	50

По данным М. В. Завариной и Ц. А. Швер, отношение $\frac{c}{a}$ для зернистой изморози и смеси чаще всего изменяется в пределах 1,00—0,50. Для указанного интервала значений $\frac{c}{a}$ относительная погрешность определения плотности составляет от 25 до 50% при $50 \text{ мм} < a < 100 \text{ мм}$ и от 27 до 60% при $100 \text{ мм} < a < 300 \text{ мм}$.

При малых размерах отложения ошибки определения его плотности настолько велики, что расчеты μ по формуле (8) становятся

нецелесообразными. Поэтому величина μ определялась лишь в тех случаях, когда большой диаметр отложения превышал 50 мм.

Нами были произведены расчеты плотности гололедных отложений на горизонтальных ($\mu_{\text{г}}$) и вертикальных ($\mu_{\text{в}}$) элементах обнинской мачты. Результаты этих расчетов (г/см^3) следующие:

$\mu_{\text{г}}$	0,18	0,29	0,44	0,44	0,11	0,32	0,30	0,30
$\mu_{\text{в}}$	0,27	0,33	0,62	0,58	0,49	0,67	0,57	0,59

Расчеты выполнены по формуле

$$\mu = \frac{0,04P}{\pi(ac - d^2)},$$

где P — вес (г/м), a и c — большой и малый диаметры отложений (см).

Поскольку отложения на вертикальных элементах имели круговую форму, нами принималось $\frac{c}{a} = 1$. Для отложений на горизонтальных стержнях, имеющих неправильную форму, использовалось принятое в настоящее время для зернистой изморози и смеси среднее отношение $\frac{c}{a} = 0,75$. Из приведенных выше данных видно, что плотность отложений на вертикальных элементах в среднем в 1,5—2 раза больше, чем на горизонтальных.

Следует отметить, что горизонтальные стержни перил имеют значительно менее шероховатую поверхность, чем вертикальные тросы. Это обстоятельство, вероятно, также в какой-то степени обуславливает различие в процессах нарастания отложений на указанных элементах.

К сожалению, весьма скудный материал по обледенению вертикальных элементов не позволяет пока достаточно надежно установить соотношение между нагрузками от гололеда на горизонтальных и вертикальных элементах. С этой целью на высотных мачтах следует проводить регулярные наблюдения над гололедом одновременно на горизонтальных и вертикальных элементах.

Плотность зернистой изморози и смеси возрастает с высотой (рис. 2).

Одной из причин уплотнения отложений с высотой следует считать, по-видимому, увеличение размеров капель в облаках по срав-

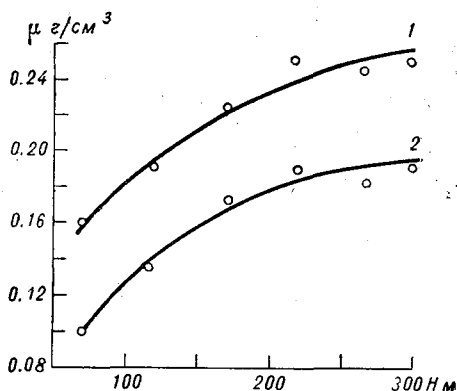


Рис. 2. Изменение с высотой плотности (μ) отложений.

1) смесь, 2) зернистая изморозь.

нению с увлажненным подоблачным слоем. Рост скорости ветра с высотой, с одной стороны, приводит к дроблению крупных капель на более мелкие, из которых часть уносится с поверхности предмета, а с другой стороны, несомненно, способствует растеканию капель по поверхности предмета до полного их замерзания, что и приводит к увеличению плотности отложения.

Распределение плотности зернистой изморози и смеси в слоях 100—200 и 200—300 м приводится в табл. 5.

Таблица 5

Повторяемость значений плотности зернистой изморози и смеси (%)

μ г/см ³	Слой 100—200 м		Слой 200—300 м	
	зернистая изморозь	смесь	зернистая изморозь	смесь
<0,10	21	12	8	4
0,11—0,20	70	47	50	22
0,21—0,30	6	35	32	68
0,31—0,40	3	4	6	3
>0,40	—	2	4	3
Число случаев	158	96	443	297

Наиболее характерные значения плотности зернистой изморози и смеси в слое 100—200 м составляют 0,11—0,30 г/см³.

В слое 200—300 м плотность зернистой изморози в 50% случаев не превышает 0,11—0,20 г/см³, а плотность смеси в 68% случаев составляет 0,21—0,30 г/см³.

Как уже указывалось в § 2 данной главы, принятые в настоящее время в качестве расчетных средние значения плотности зернистой изморози и смеси, определенные по данным наземных наблюдений, составляют 0,1 и 0,2 г/см³.

Для сравнения приведем полученные нами средние величины плотности для этих видов отложений по слоям:

Слой (м)	100—200	200—300
Зернистая изморозь (г/см ³)	0,14	0,17
Смесь (г/см ³)	0,18	0,24

Плотность зернистой изморози и смеси в слое 100—200 м мало отличается от определенных по наземным данным расчетных значений μ , а в слое 200—300 м она примерно в 1,5 раза выше.

Б. М. Беленьким [10] на вершине горы Юкспор (высота над уровнем моря 902 м) в Хибидах наблюдались еще более плотные отложения зернистой изморози и смеси, средний удельный вес которых составлял 0,26 и 0,42 г/см³ соответственно. И. Кольбиг и Ф. Беккерт [114] отмечают, что смешанные отложения зернистой

изморози с гололедом чаще всего имеют плотность 0,3—0,6 г/см³.

По И. М. Белоусу [11], средние значения μ в горных районах Казахстана равны 0,3 г/см³ для смеси и 0,2 г/см³ для зернистой изморози.

Для расчета гололедных нагрузок на элементы высотных сооружений, расположенные в слоях 100—200 и 200—300 м, можно рекомендовать средние значения плотности зернистой изморози и смеси, приведенные выше для этих слоев.

§ 4. Повторяемость различных видов отложений, образующихся на высотных сооружениях в облаках нижнего яруса

В работе [49] указано, что основным фактором, определяющим появление гололедно-изморозевых отложений на высотных сооружениях, являются облака нижнего яруса.

В облачности создается достаточное влагонасыщение воздуха ввиду наличия большого числа капелек воды различного размера. Однако для замерзания этих капель на поверхности элемента сооружения, в результате чего образуется отложение, необходимы определенные температурные условия, способствующие переохлаждению капель, в результате чего последние, соприкасаясь с более холодной поверхностью элемента, замерзают на нем.

Как указывают А. Вегенер [21], С. Б. Гапонов [31], В. В. Бургсдорф [16] и Л. Г. Качурин [63—65], скорость замерзания капли, которая определяет весь ход процесса и структуру образующегося осадка, будет зависеть от степени ее переохлаждения, размера и температуры поверхности предмета, на котором образуется отложение. Все указанные факторы определяются температурой среды (воздуха), которая, таким образом, оказывает большое влияние на формирование и структуру образующегося осадка.

Отложения гололеда и изморози могут наблюдаться также в увлажненном подоблачном слое, который является своеобразным «невидимым» продолжением облачной массы и располагается под нижней кромкой облаков. Однако следует отметить, что по данным Ф. Я. Клинова [67, 68] скорости нарастания отложений в увлажненном подоблачном слое невелики и сами отложения поэтому не достигают больших размеров и веса.

Кроме того, увлажненные подоблачные слои не всегда прослеживаются достаточно четко, поэтому судить об истинной повторяемости гололедно-изморозевых отложений в указанных слоях довольно трудно.

Таким образом, для того чтобы судить о вероятности образования гололедно-изморозевых отложений на высотных сооружениях в каком-либо пункте, необходимо знать, во-первых, вероятность появления облаков с определенными температурами (отрицательными, либо положительными, но близкими к нулю) в них над дан-

ным пунктом и, во-вторых, вероятность образования отложений в облаках при указанных температурах.

В настоящее время запросы практики требуют расчета гололедных нагрузок на высотные сооружения, расположенные в различных пунктах территории СССР. Между тем, данные об образовании отложений на высотных сооружениях поступают в настоящее время только с обнинской мачты. Следовательно, о вероятности образования различных видов отложений на высотных сооружениях в различных пунктах территории СССР можно судить лишь на основании аэрологических данных об облаках нижнего яруса и температуре в них.

Так, И. М. Белоус и М. В. Заварина [12], используя данные о повторяемости высоты нижней кромки облаков при отрицательной температуре для ряда пунктов территории Казахстана, оценили вероятность обледенения высотных сооружений, расположенных в этих пунктах.

Располагая данными наблюдений на обнинской мачте, можно определить сравнительную частоту образования различных видов отложений на ее элементах в облаках.

Полученные результаты могут быть использованы для районов с аналогичными характеристиками облаков нижнего яруса.

Нами рассчитана относительная повторяемость различных видов отложений по весу и размерам в облаках различных форм (в процентах к общему числу случаев образования отложений в облаках).

При расчете повторяемости к слоистым облакам были отнесены St, а также St в сочетании с Sc при преобладании первых.

Аналогично рассчитывалась повторяемость отложений в слоисто-кучевых (Sc), слоисто-дождевых (Ns) и разорванно-дождевых (Frb) облаках.

Из 820 периодов нарастания отложений, имевших место в слое 100—300 м, в 456 нарастание отложений происходило в облаках в 358 — в увлажненном подоблачном слое и в 6 периодах — при радиационном выхолаживании. Ниже приводится относительная повторяемость гололедно-изморозевых явлений в облаках нижнего яруса:

Облака	St	Sc	Ns	Frb	Число случаев
Повторяемость (%)	49	17	20	14	456

Чаще всего гололедно-изморозевые явления наблюдались в слоистых облаках (49%), реже в облаках других форм. По-видимому, это связано с тем, что вероятность обледенения в St, согласно [47, 94, 100], вообще выше, нежели в облаках других форм. Возможно также, что слоистые облака при отрицательной температуре над некоторыми пунктами встречаются чаще, чем слоисто-кучевые и слоисто-дождевые. Так, например, в Алма-Ате, Актюбинске и Кзыл-Орде, по данным И. М. Белоуса и М. В. Завариной [12], повторяемость St при отрицательной температуре очень высока (66—

77%), в то время как облака других форм встречаются значительно реже.

Большой интерес представляет распределение в облаках различных видов отложений (табл. 6).

Таблица 6

Относительная повторяемость различных видов отложений
в облаках нижнего яруса (%)

Форма облачности	Вид отложений				Число случаев
	зернистая изморозь	смесь	гололед	кристаллическая изморозь	
St	48	30	18	4	227
Sc	66	28	6	—	75
Ns	36	36	28	—	89
Frnb	33	35	26	6	65

Далее была определена повторяемость гололедно-изморозевых отложений в облаках указанных форм при различной температуре в них (табл. 7).

Таблица 7

Относительная повторяемость гололеда и изморози при различной
температуре в облаках нижнего яруса (%)

Форма облач- ности	Температура воздуха (°C)							Общее число случаев
	0,0 —2,0	—2,1 —4,0	—4,1 —6,0	—6,1 —8,0	—8,1 —10,0	—10,1 —12,0	—12,1 —14,0	
St	30	16	16	11	15	10	2	227
Sc	14	8	31	24	13	5	5	78
Ns	52	28	10	5	3	1	1	92
Frnb	47	19	19	9	6	—	—	65

В слоисто-дождевых и разорванно-дождевых облаках гололедно-изморозевые отложения чаще всего наблюдаются при температуре от 0 до -2°C (52 и 47% соответственно). С понижением температуры повторяемость отложений в облаках указанных форм резко уменьшается и при температуре ниже -6°C становится крайне малой.

Образование отложений в слоистых облаках также наиболее часто происходит при температуре от 0 до -2°C . С понижением температуры повторяемость отложений в слоистых облаках уменьшается более равномерно, чем в Ns и Frnb.

Характерно, что в слоисто-кучевых облаках наибольшая повторяемость приходится на более низкие температуры, от $-4,1$ до $-8,1^{\circ}\text{C}$.

Наибольший интерес представляет распределение отложений по размеру и весу в облаках St, Sc, Ns и Frnb.

Из табл. 8 видно, что отложения диаметром менее 100 мм чаще всего наблюдаются в облаках St и Sc, значительно реже — в об-

Таблица 8

Относительная повторяемость отложений по диаметру
в облаках нижнего яруса (%)

Форма облачности	Диаметр (мм)			
	менее 50	50—99	100—150	более 150
St	57	68	58	6
Sc	23	14	—	—
Ns	12	11	31	72
Frnb	8	7	11	22
Число случаев	245	163	32	16

лаках Ns и Frnb. Повторяемость отложений, имеющих диаметр 100—150 мм, в облаках Ns и Frnb возрастает (до 31 и 11% соответственно). Наиболее интенсивные отложения (диаметр более 150 мм) преобладают в облаках Ns (72%), реже наблюдаются в Frnb (22%) и очень редко (6%) — в облаках St. В облаках Sc отложений диаметром более 100 мм не наблюдалось.

Немногочисленные случаи интенсивных отложений по весу наблюдаются целиком в облаках Ns (табл. 9).

Тот факт, что наиболее значительные отложения чаще всего

Таблица 9

Относительная повторяемость отложений различного
веса в облаках нижнего яруса (%)

Форма облачности	Вес (кг/м)			
	менее 1,00	1,00—1,99	2,00—3,00	более 3,00
St	49	50	45	—
Sc	25	5	10	—
Ns	17	24	35	100
Frnb	9	21	10	—
Число случаев	398	39	14	5

наблюдались в слоисто-дождевых облаках, объясняется тем, что последние содержат больше крупных капель [15, 94, 99, 100].

По данным И. М. Белоуса и М. В. Завариной [12], повторяемость N_s , $F_{гпб}$ при отрицательной температуре над Алма-Атой, Актюбинском, Карагандой, Кызыл-Ордой и Кустанаем составляет 22—35%, а над Семипалатинском — 61%. Отсюда следует, что в указанных районах на высотных сооружениях могут наблюдаться значительные гололедно-изморозевые отложения, причем в районе Семипалатинска вероятность образования таких отложений значительно выше, чем в других указанных выше пунктах.

Интересно сравнить температурные границы образования отложений, с одной стороны, в облаках нижнего яруса и увлажненном подоблачном слое, а с другой — в приземном тумане и при радиационном выхолаживании. Это очень важно как для объяснения особенностей процесса гололедообразования, так и для практических целей, поскольку отрицательные температуры оказывают при гололеде дополнительное воздействие на высотные сооружения. Естественно поэтому, что данным вопросом занимались многие исследователи, в том числе Б. С. Гапонов [31], Н. С. Муретов [80, 81], К. С. Туроверов [92], Ю. Н. Андреев [4], А. Г. Балабуев [8], В. В. Бургсдорф [16].

В 1965 г. были приняты следующие нормы температуры воздуха при расчете нагрузок от гололеда: -10°C на территории к востоку от Енисея и к северу от 60-й параллели, за исключением береговой полосы океанов и морей, -5°C для остальной части СССР [93]. Рекомендаций по нормативной температуре воздуха при расчете гололедных нагрузок на высотные сооружения в настоящее время не имеется.

Нами была рассчитана повторяемость температуры воздуха в начале нарастания отложений на высотных сооружениях в облаках нижнего яруса и увлажненном подоблачном слое (табл. 10).

Таблица 10

Повторяемость температуры воздуха в начале нарастания различных видов отложений на высотных сооружениях в облаках нижнего яруса и увлажненном подоблачном слое (%)

Вид отложений	Температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$)										Число случаев
	0,0 —2,0	—2,1 —4,0	—4,1 —6,0	—6,1 —8,0	—8,1 —10,0	—10,1 —12,0	—12,1 —14,0	—14,1 —16,0	—16,1 —18,0	—18,1 —20,0	
Зернистая изморозь	11	10	13	20	27	6	7	5	1	—	190
Смесь . . .	23	10	23	30	2	4	1	—	5	1	150
Гололед . .	43	35	21	1	—	—	—	—	—	—	53

Интересно сравнить полученные нами данные с повторяемостью температурных границ образования различных видов отложений в приземном тумане.

По Б. С. Гапонову [31], гололед чаще всего наблюдается при температуре от 0 до -3°C , Н. С. Муретов [80, 81] и К. С. Турсыров [92] считают нижней границей образования гололеда температуру -5°C . В. В. Бургсдорфом [16] в опытных условиях, близких к природным, были получены чисто гололедные формации при температурах от $-3,5$ до $-4,0^{\circ}\text{C}$. А. Г. Балабуев [8] считает нижним пределом гололедообразования температуру -5°C . Ю. Н. Андреев [4] отмечает, что гололедные образования могут наблюдаться и при температуре ниже -5°C . По его данным, повторяемость температуры ниже -6°C при образовании гололеда составляет 8%.

Из сравнения табл. 10 и 11 видно, что при наличии (сохранении) отложений на высотных сооружениях несколько увеличивает

Таблица 1

Повторяемость температуры воздуха при наличии отложений на высотных сооружениях (%)

Слой 265—301 м

Вид отложений	Температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$)										Число случаев
	0,0 —2,0	—2,1 —4,0	—4,1 —6,0	—6,1 —8,0	—8,1 —10,0	—10,1 —12,0	—12,1 —14,0	—14,1 —16,0	—16,1 —18,0	—18,1 —20,0	
Зернистая изморозь	9	10	12	22	30	10	2	2	2	1	255
Смесь . . .	10	8	25	28	12	13	4	1	—	—	168
Гололед . .	40	35	18	3	2	1	1	—	—	—	82

ся повторяемость более низких температур (ниже -12°C), которые в начале нарастания отложений наблюдались редко.

Поскольку наибольшие отложения представляют для практики особый интерес, нами были выбраны случаи, когда толщина стенки гололеда в слое 265—301 м превышала 10 мм. Оказалось, что такие отложения в 97% случаев образуют зернистая изморозь и смесь. Повторяемость температуры воздуха при указанных отложениях следующая:

Температура ($^{\circ}\text{C}$)		Повторяемость (%)
от	до	
0,0	—2,5	15
—2,6	—5,0	25
—5,1	—7,5	7
—7,6	—10,0	20
—10,1	—12,5	28
—12,6	и ниже	5
Число случаев		262

В 60% случаев при отложениях с толщиной стенки гололеда более 10 мм наблюдалась температура воздуха ниже нормы, указанной в СНиП (-5°C), причем в 53% случаев температура была ниже $-7,5^{\circ}\text{C}$.

Наибольший процент отложений с толщиной стенки более 10 мм оказался при температуре от $-7,5$ до $-12,5^{\circ}\text{C}$, поэтому в качестве расчетной температуры при гололеде следует принять температуру -10°C .

Глава II. ВЕТРОВОЙ РЕЖИМ ПРИ ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫХ ЯВЛЕНИЯХ В НИЖНИХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ

Образование отложений гололеда и изморози на высотных сооружениях, их сохранение и разрушение определяются целым комплексом метеорологических факторов, в том числе и ветром.

Скорость ветра определяет количество переносимой в единицу времени влаги, т. е. заметно влияет на интенсивность процесса.

Влагонесущий поток обтекает предмет, подвергающийся обледенению, и распределение капель по его поверхности (а значит форма образующегося отложения, степень охвата им предмета) зависит от характера обтекания.

Значительное влияние оказывает скорость ветра и на структуру отлагающегося льда, поскольку она способствует слиянию и дроблению капель, их соударению, сдуванию с поверхности предмета, а при определенных условиях и растеканию капель по поверхности объекта, вследствие чего отложение становится более плотным.

Известно, что ветер сам по себе действует на сооружения, создавая ветровую нагрузку, которая должна учитываться при проектировании.

Гололедно-изморозевые отложения, образующиеся на различных объектах, изменяют их форму и увеличивают площадь, подвергающуюся действию ветра. Поэтому увеличивается ветровая нагрузка, действующая на эти объекты.

Исследованиями ветрового режима, сопутствующего гололедно-изморозевым явлениям в приземном слое, занимались Ю. Н. Андреев [4], А. А. Дмитриев [40, 42], А. Г. Балабуев [8], Б. С. Гапонов [31], К. С. Туроверов [92], Л. Г. Качурин [63], Ц. А. Швер [101, 102].

Повторяемость скоростей ветра при наличии отложений на обнинской мачте за сезон 1963-64 г. рассматривалась М. В. Завариной и М. М. Борисенко [50].

Нами рассматривается распределение скоростей ветра и порывистость ветра в слое 300 м при наличии гололедно-изморозевых отложений на высотных сооружениях, а также оценивается точность аппроксимации вертикальных профилей ветра в этом слое.

§ 1. Распределение скоростей ветра

Повторяемость скоростей ветра при отложениях различной интенсивности весьма важно знать как для расчета гололедно-ветровых нагрузок, так и для изучения влияния скорости ветра на процесс гололедообразования.

Ю. Н. Андреев [4] рассматривал режим скоростей ветра при гололедно-изморозевых явлениях в ряде пунктов Европейской территории СССР. Он отмечает, что в 60% случаев нарастание отложений происходило при скоростях ветра 0—7 м/сек.

А. Г. Балабуев [8], изучавший гололедно-изморозевые явления в Закавказье, установил, что при обледенении проводов скорости ветра чаще всего не превышают 4—5 м/сек. Однако в верхних горных зонах, отмечает А. Г. Балабуев, при отложениях гололеда и изморози на проводах могут наблюдаться большие скорости ветра до 17—20 м/сек.).

Б. С. Гапонов [31], К. С. Туроверов [92], Н. С. Муретов [80, 81] считают наиболее характерными для образования отложений скорости 7—8 м/сек. При изморозевых отложениях, по данным Н. С. Муретова [80, 81] и А. А. Дмитриева [40, 42], преобладают штили и слабые ветры.

Следует отметить, что указанные выше авторы рассматривали изморозь вообще, не выделяя два совершенно различных вида отложения: зернистую изморозь и кристаллическую.

Что касается кристаллической изморози, то этот вид отложений действительно чаще всего образуется в периоды затишья или при очень слабом ветре. Более того, она может сохраняться только при скоростях ветра не больше 7—8 м/сек. С усилением ветра кристаллическая изморозь, обладающая рыхлой, пористой структурой, как правило, разрушается.

Мощные отложения зернистой изморози, так же как и гололед, наблюдаются при прохождении фронтов и сопровождаются ветрами скоростью 10—12 м/сек. и более, на что указывают Л. Г. Качурин [63], А. Г. Балабуев [8], Г. Н. Леукина [72], И. М. Белоус [11].

Распределение скоростей ветра при образовании отложений на обнинской мачте по данным наблюдений за сезон 1963-64 г. впервые исследовалось М. В. Завариной и М. М. Борисенко [50]. Авторы установили, что в слоях 100—200 и 200—300 м при отложениях диаметром более 60 мм преобладают ветры скоростью 7—9 м/сек. По данным М. В. Завариной и М. М. Борисенко, скорости ветра более 15 м/сек. наблюдались в 3% случаев в слое 100—200 м и в 7% случаев в слое 200—300 м, причем диаметр отложения в этих случаях не превышал 20 мм.

Нами рассматривается повторяемость скоростей ветра в слоях 100—200 и 200—300 м при отложениях диаметром менее 50, 50—99, 100—149, 150 мм и более (гололед, зернистая изморозь и смесь рассматриваются вместе; случаи, когда наблюдалась кристаллическая изморозь, исключены).

На рис. 3 а видно, что в слое 100—200 м при отложениях, имеющих диаметр 100—149 мм, чаще всего наблюдаются скорости ветра 6—8 м/сек. (47%). Повторяемость скоростей 4—6 м/сек. составляет 15%. В 10% случаев наблюдались скорости ветра 2—4 м/сек. Ветер со скоростью менее 2 м/сек. при отложениях диаметром

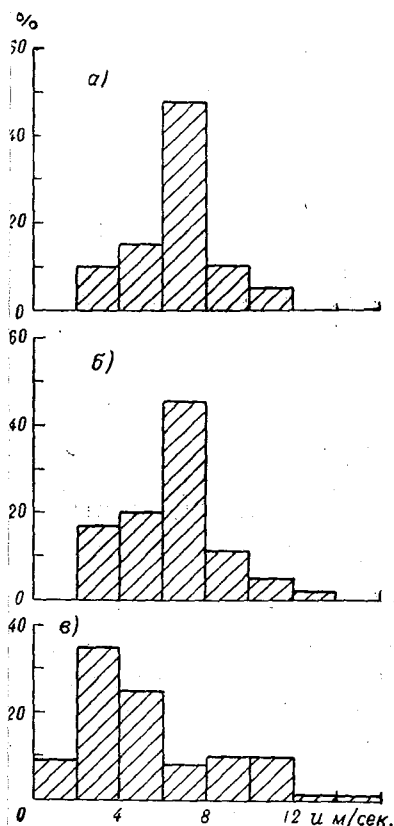


Рис. 3. Повторяемость скоростей ветра (u) в слое 100—200 м при различных диаметрах отложений.

а) 100—149 мм, б) 50—59 мм, в) менее 50 мм.

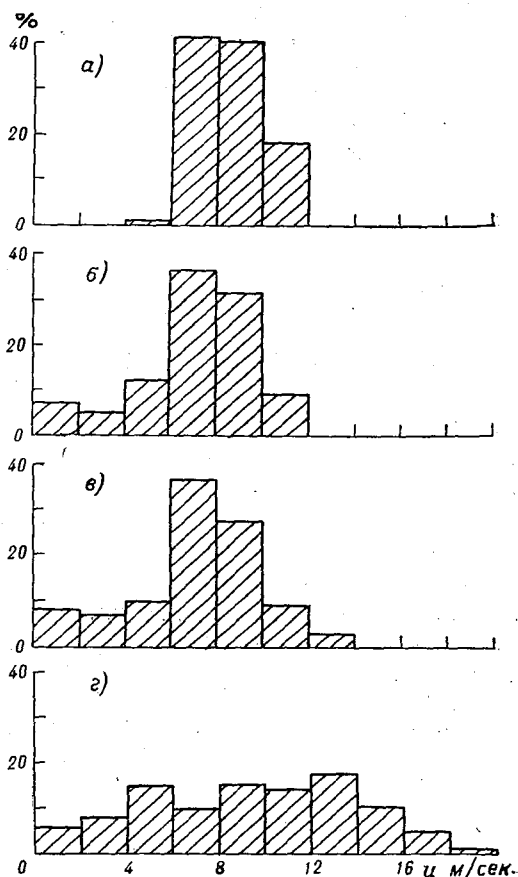


Рис. 4. Повторяемость скоростей ветра (u) в слое 200—300 м при различных диаметрах отложений.

а) 150 мм и более, б) 100—149 мм, в) 50—99 мм, г) менее 50 мм.

100—149 мм в этом слое не наблюдались. Скорости более 8 м/сек. наблюдались при отложениях с таким диаметром в 15% случаев. Скорости более 12 м/сек. за пятилетний период не наблюдались ни разу.

Аналогичное распределение скоростей ветра наблюдалось при отложениях диаметром 50—99 мм (рис. 3 б). И в этом случае преобладают скорости ветра 6—8 м/сек. (45%), а скорости

4—6 м/сек. наблюдаются в 20% случаев. Повторяемость скоростей ветра 12—14 м/сек. составляет всего 2%. Скорости менее 2 м/сек. и более 4 м/сек. при отложениях указанного диаметра не наблюдались.

При малых размерах отложений (рис. 3 в) в слое 100—200 м максимум повторяемости смещается в сторону меньших скоростей ветра: 2—4 м/сек. (35%) и 4—6 м/сек. (25%). Повторяемость других скоростей ветра незначительна.

Распределение скоростей ветра в слое 200—300 м представлено на рис. 4.

При наиболее мощных отложениях в указанном слое (диаметр более 150 мм) преобладают скорости ветра 6—10 м/сек. (80% случаев). Значительно реже наблюдаются скорости 10—12 м/сек. (18%). Всего 2% случаев приходится на скорости 4—6 м/сек. Другие скорости ветра при указанном диаметре отложений в слое 200—300 м не наблюдались. При отложениях диаметром 100—149 и 50—99 мм преобладают скорости 6—10 м/сек.

При отложениях малого размера (менее 50 мм) в слое 200—300 м преобладания скоростей ветра каких-либо градаций не наблюдается.

§ 2. Вертикальные профили ветра

Для расчета гололедно-ветровых нагрузок на высотные сооружения недостаточно знать общее распределение скоростей ветра при отложениях различного диаметра. Необходимо еще учитывать изменение скорости ветра с высотой в исследуемом слое, т. е. знать вертикальные профили ветра.

В [93] рекомендуется при вычислении ветровых нагрузок на обледенелые элементы высоких сооружений принимать за основу половину расчетной скорости (возможной один раз в 5 или 10 лет) у поверхности Земли. Предполагается, что указанная величина изменяется с высотой по логарифмическому закону, т. е. согласно формуле

$$u_2 = u_1 \frac{\ln \frac{z_2}{z_0}}{\ln \frac{z_1}{z_0}}, \quad (11)$$

где u_1 и u_2 — скорости ветра на высотах z_1 и z_2 ; z_0 — параметр шероховатости (м).

По формуле (11) при $z_0 = 0,08$ м были рассчитаны поправочные коэффициенты C_n к скоростному напору для высот 100 и 350 м. Указанные коэффициенты учитывают возрастание скорости ветра с высотой и приведены в «Строительных нормах и правилах» [91].

Таким образом, для определения ветровой нагрузки, действующей на обледенелый элемент сооружения, расположенный на высоте H , достаточно скоростной напор, рассчитанный по половине расчетной скорости у поверхности Земли, умножить на поправочный коэффициент для указанной высоты C_n .

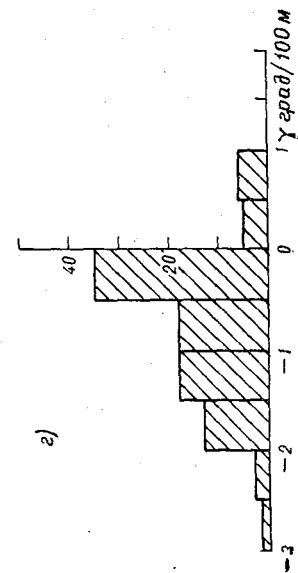
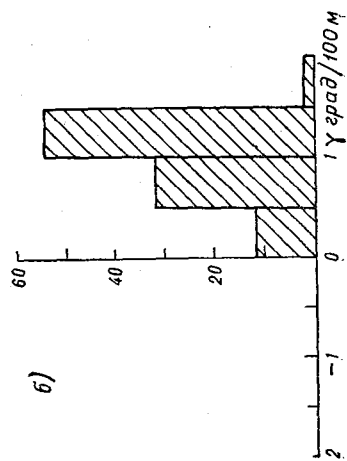
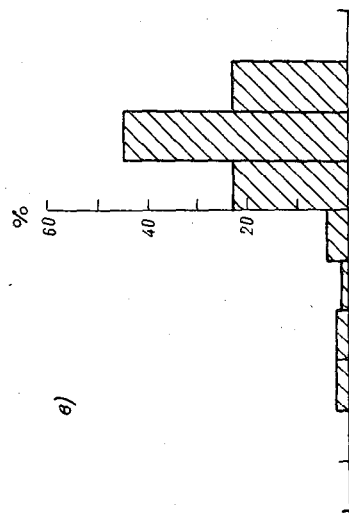
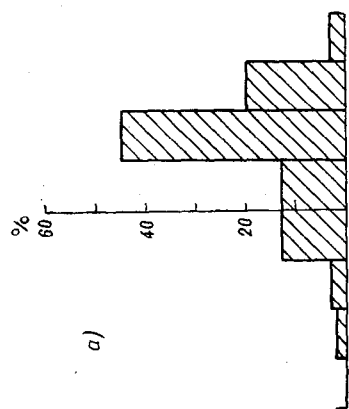


Рис. 5. Повторяемость вертикальных градиентов температуры γ град/100 м.
 а) зернистая изморозь, б) гололед,
 в) смесь, г) кристаллическая изморозь.

Действительные профили ветра при гололедно-изморозевых явлениях до настоящего времени исследовались лишь в слое 10—20 м над поверхностью Земли [1, 46].

О. А. Дроздов и А. В. Руднева [46] отмечают, что профиль ветра в приземном слое при наличии гололеда и изморози весьма близок к логарифмическому. Однако это относится только к самому нижнему 25-метровому слою воздуха.

В настоящем параграфе нами оценивается точность аппроксимации вертикальных профилей скорости ветра линейной, степенной и логарифмической функциями высоты при различных видах отложений в нижнем 300-метровом слое.

Как известно, профиль ветра весьма существенно зависит от стратификации атмосферы. Поэтому сначала рассмотрим термическую стратификацию указанного слоя при различных видах отложений.

Средний вертикальный градиент температуры определялся по данным двух уровней: 2 и 301 м. Распределение температурных градиентов при гололеде, зернистой изморози и смеси, кристаллической изморози представлено на рис. 5. Из рисунка видно, что кристаллическая изморозь наблюдается главным образом при слабой инверсии, зернистая изморозь и смесь — при градиентах, близких к адиабатическим, а гололед чаще всего наблюдается при неустойчивой стратификации атмосферы. Однако в отдельных случаях гололед, зернистая изморозь и смесь наблюдались при инверсионном распределении температуры. Причем при гололеде отмечались небольшие градиенты температуры, а при зернистой изморози и смеси — значительные, около нескольких градусов на 100 м.

Затем нами были рассчитаны средние градиенты температуры для каждого вида отложения и соответствующие им коэффициенты вариации $k = \frac{\sigma_\gamma}{\bar{\gamma}}$ (где σ_γ — среднее квадратическое отклонение величины γ). Результаты расчетов даны в табл. 12.

Таблица 12

Изменчивость средних вертикальных градиентов температуры при различных видах отложений

Вид отложения	$\bar{\gamma} \frac{\text{град}}{100 \text{ м}}$	$\sigma_\gamma \frac{\text{град}}{100 \text{ м}}$	k
Кристаллическая изморозь	—0,61	2,19	1,36
Зернистая изморозь, смесь	0,38	1,04	2,74
Гололед	0,87	0,65	0,75

Из таблицы видно, что средний градиент температуры при кристаллической изморози — инверсионный; наибольший положительный градиент наблюдается при гололеде. Значения γ оказываются

наиболее устойчивыми при гололеде и наиболее изменчивыми при зернистой изморози и смеси.

Далее были рассчитаны средние скорости ветра на каждой высоте при инверсии, устойчивом и равновесном состоянии атмосферы и при сверхadiaбатических градиентах температуры для гололеда, смеси, зернистой и кристаллической изморози. Полученные значения скоростей ветра спрямлялись на клетчатке, построенной в полулогарифмических (u , $\lg z$) координатах. Иначе говоря, средние профили ветра аппроксимировались с помощью формулы (11) и формул

$$u_2 = u_1 + A(z_2 - z_1), \quad (12)$$

$$u_2 = u_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^m, \quad (13)$$

где A — угловой коэффициент прямой; m — показатель степени, зависящий от стратификации атмосферы, скорости ветра у поверхности Земли и других факторов.

Таблица 13

Точность аппроксимации вертикальных профилей ветра в слое 8—301 м

$\bar{v}$ град 100 м	σ_1	σ_2	σ_3	r_1	r_2	r_3	z_0	A	m
Гололед									
<0	0,53	0,55	0,34	0,07	0,08	0,05	1,20	0,018	0,72
0,1—0,9	0,47	0,28	0,42	0,08	0,05	0,07	0,72	0,021	0,29
1	0,36	0,36	0,34	0,06	0,04	0,06	0,58	0,019	0,20
>1	0,55	0,47	0,48	0,09	0,08	0,08	0,52	0,016	0,17
Зернистая изморозь, смесь									
<0	1,02	0,33	0,80	0,17	0,05	0,13	4,30	0,023	0,32
0,1—0,9	0,68	0,34	0,39	0,10	0,05	0,06	1,60	0,021	0,22
>1	0,64	0,51	0,52	0,09	0,07	0,07	0,68	0,018	0,19
Кристаллическая изморозь									
<0	0,32	0,32	0,22	0,12	0,12	0,08	0,40	0,009	0,22

Для сравнения точности аппроксимации профилей ветра по трем формулам были вычислены средние квадратические отклонения (м/сек.) точек от прямых, представляющих профили ветра в полулогарифмических, декартовых и логарифмических координатах (σ_1 , σ_2 , σ_3). Кроме того, были вычислены относительные значения средних квадратических ошибок r_1 , r_2 и r_3 по формуле $r = \frac{\sigma_u}{\bar{u}}$, где σ_u — средняя квадратическая ошибка аппроксимации профиля ветра в слое; $\bar{u}$ — средняя скорость ветра в слое.

В каждом случае определялись значения параметров A , m , z_0 , входящих в формулы (11)—(13). Следует отметить, что z_0 в фор-

муле (11) представляет собой не параметр шероховатости, а некий эмпирический параметр, зависящий главным образом от стратификации атмосферы и скорости ветра у поверхности Земли.

Величина z_0 определялась по значению начальной абсциссы. Для этого прямые, представляющие профили ветра в полулогарифмических координатах, экстраполировались до нулевой ординаты. Значения A и m определялись по тангенсу угла наклона прямых, представляющих профили ветра в линейных и логарифмических координатах.

Результаты расчетов представлены в табл. 13.

Из таблицы видно, что при слабых инверсиях в слое 8—300 м во время гололеда и кристаллической изморози степенная функция дает несколько более точное приближение, чем линейная и логарифмическая. При использовании двух последних ошибки аппроксимации оказываются равными.

В тех случаях, когда зернистая изморозь и смесь наблюдаются в этом слое при инверсии, линейная функция оказывается точнее логарифмической и степенной. Если же эти виды отложений наблюдаются при устойчивом состоянии или сверхадиабатических градиентах, степенная и линейная функции описывают профили ветра точнее, чем логарифмическая. При этом они дают близкие по величине ошибки.

При равновесных и сверхадиабатических градиентах температуры во время гололеда все три функции описывают профили ветра в 300-метровом слое с одинаковой ошибкой.

Если гололед наблюдается при устойчивом состоянии атмосферы, наибольшую точность дает линейная функция, а ошибки логарифмической и степенной функций одинаковы.

При зернистой изморози и смеси величины A , m и z_0 закономерно уменьшаются с увеличением γ . Однако при условиях, характерных для образования гололеда, значения A и m вначале возрастают, а затем, при градиентах, близких к адиабатическим, начинают уменьшаться.

Аналогичные расчеты были проведены для профилей ветра в каждом отдельном случае. По каждой группе профилей были рассчитаны интегральные повторяемости $\sigma_{\text{л}}$, $\sigma_{\text{с}}$, $\sigma_{\text{лог}}$. Результаты этих расчетов показали, что в условиях слабой инверсии, при которой главным образом и наблюдается кристаллическая изморозь, степенная функция является более точной. Наибольшие ошибки получаются при аппроксимации этих профилей линейной функцией.

При адиабатических и сверхадиабатических градиентах во время гололеда линейная, степенная и логарифмическая формулы дают одинаковые ошибки.

В качестве характеристик изменчивости параметров A , m и z_0 использовались относительные отклонения указанных параметров от их средних значений:

$$R_A = \frac{A_i - \bar{A}}{\bar{A}}, \quad R_m = \frac{m_i - \bar{m}}{\bar{m}}, \quad R_{z_0} = \frac{z_{0i} - \bar{z}_0}{\bar{z}_0}. \quad (14)$$

Здесь A_i , m_i и z_{0i} — значения параметров в каждом отдельном случае; $\overline{A}$, $\overline{m}$ и $\overline{z_0}$ — их средние значения.

Оказалось, что при гололеде m и z_0 изменяются в одинаковых пределах, а A варьирует значительно больше. При кристаллической изморози наиболее устойчивыми являются значения m , а наиболее изменчивыми — A . При гололеде A и m изменяются значительно меньше, чем при кристаллической изморози.

§ 3. Порывистость ветра¹

Известно, что одним из многочисленных проявлений атмосферной турбулентности являются непрерывные колебания скорости направления ветра, называемые порывами, или пульсациями.

В. Н. Иванов и З. И. Волковицкая [61] указывают, что спектр родольной составляющей скорости ветра содержит целый ряд колебаний с периодами от нескольких десятков минут до долей секунды.

Пусть $\bar{u}$ — скорость ветра, осредненная за интервал времени τ . Внутри этого интервала будут наблюдаться скорости как меньше указанной средней величины, так и превышающие ее. Эти скорости, осредненные за малые промежутки времени Δt внутри интервала τ , будут являться порывами по отношению к скорости $\bar{u}$, интервал осреднения которой равен τ . В свою очередь величина $\bar{u}$ будет являться пульсацией по отношению к скорости u_n , осредненной за промежутки времени $n\tau$, если $n\tau > \tau$ и т. д.

Применительно к воздействию ветра на строительные сооружения понятия «средняя скорость» и «порыв» ветра имеют следующий смысл. Пусть T — период собственных колебаний сооружения, τ — интервал осреднения скорости ветра. Если τ значительно превышает T , то мы говорим о средней скорости ветра, действующей на сооружения статически. Если же интервал осреднения скорости ветра τ близок к T , мы вправе говорить о порыве ветра, который оказывает на конструкцию динамическое воздействие.

Таким образом, ветровая нагрузка, действующая на сооружение, включает в себя статическую часть, определяемую средней скоростью ветра, и динамическую, обусловленную порывами.

Как указывают Л. С. Гандин [30], В. Н. Иванов и З. И. Волковицкая [61], точный расчет ветровых нагрузок на различные строительные сооружения требует тщательного исследования спектра пульсаций скорости ветра в диапазоне частот 0,1—10,0 гц, представляющем наибольший интерес для практики.

В настоящее время рассчитывается лишь статическая часть ветровой нагрузки, действующей на обледенелые высокие сооружения. Динамическое воздействие порывов ветра не учитывается, поскольку последние не могут быть измерены из-за обледенения датчиков высокочувствительной аппаратуры, применяемой для регистрации скорости ветра на высотных мачтах.

¹ Параграф написан совместно с М. М. Борисенко.

Между тем учет динамической составляющей ветровой нагрузки при гололеде имеет большое практическое значение. Воздействие порывов ветра на сооружения носит колебательный характер, и в тех случаях, когда частота порыва совпадает с частотой собственных колебаний сооружения, это может привести к аварии.

Как отмечают Л. Е. Анапольская и Л. С. Гандин [2], физический смысл совместного воздействия гололеда и ветра на сооружения до настоящего времени недостаточно ясен.

Тем не менее уже сейчас представляется возможным оценить динамическое воздействие порывов ветра на обледенелые сооружения по данным измерений скорости ветра на обнинской мачте в отсутствие гололедно-изморозевых отложений.

Как известно, порывистость ветра определяется шероховатостью подстилающей поверхности, средней скоростью ветра и стратификацией атмосферы. Поэтому правомерно допустить, что характеристики порывистости ветра при заданных значениях этих параметров должны быть одинаковыми как при отсутствии гололедно-изморозевых отложений, так и при наличии последних на высотных сооружениях.

Наиболее удобно характеризовать порывистость ветра отношением максимальной в порыве скорости $u_{\max}$, осредненной за малый промежуток времени $\Delta\tau$, к средней скорости ветра $\bar{u}$, осредненной за период времени τ , как это делают Е. Дикон [109, 110], Э. Давенпорт [107, 108], Дж. Нутт [117] и Р. Шерлок [118, 119].

Указанная величина, рассчитываемая по формуле

$$K = \frac{u_{\max}}{\bar{u}}, \quad (15)$$

носит название коэффициента порывистости.

Поскольку период собственных колебаний большинства высоких сооружений (телевизионных и радиорелейных мачт, антенн и т. п.) составляет несколько секунд, а интервал осреднения скорости по флюгеру, который является основным прибором на сети станций, равен примерно двум минутам, для расчета динамических ветровых нагрузок на указанные сооружения необходимо знать коэффициент порывистости $K = \frac{u_{\max}}{\bar{u}}$ при $\Delta\tau = 2$ сек. и $\tau = 2$ мин. Отсюда $n = \frac{\tau}{\Delta\tau}$, где n — число малых промежутков времени $\Delta\tau$ внутри интервала. Поэтому указанный коэффициент порывистости обозначим K_{60} .

Так как порывистость ветра определяется шероховатостью подстилающей поверхности, средней скоростью ветра и температурной стратификацией атмосферы, нужно получить коэффициенты порывистости ветра при различных значениях средней скорости ветра и вертикального температурного градиента γ (шероховатость считаем постоянной).

Зависимость порывистости ветра от указанных факторов исследовалась многими авторами. И. Д. Андреев [5, 6] рассматривал

зависимость порывистости в приземном слое от средней скорости и шероховатости подстилающей поверхности z_0 . Данные о порывах тра при больших скоростях приводятся в работах Э. Давенпорта [108], Е. Дикона [109, 110], Дж. Нутта [117], Р. Шерлока [118], Сома [121]. Сравнительно мало сведений об измерениях

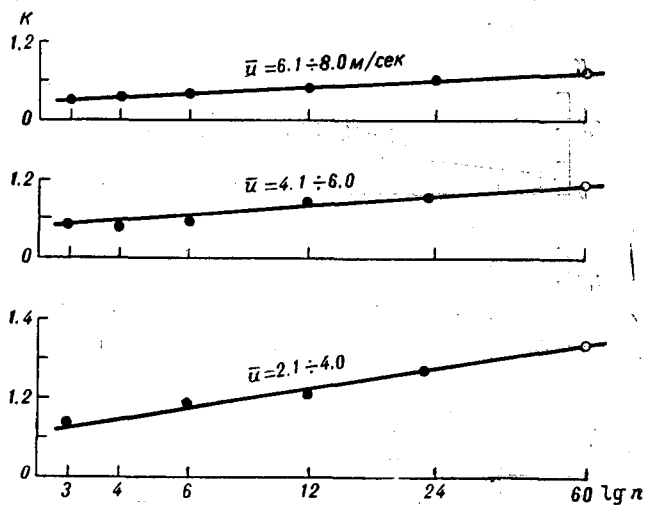


Рис. 6. Зависимость K от $\lg n$ в слое 49—121 м при $\gamma < -2.0$ град/100 м.

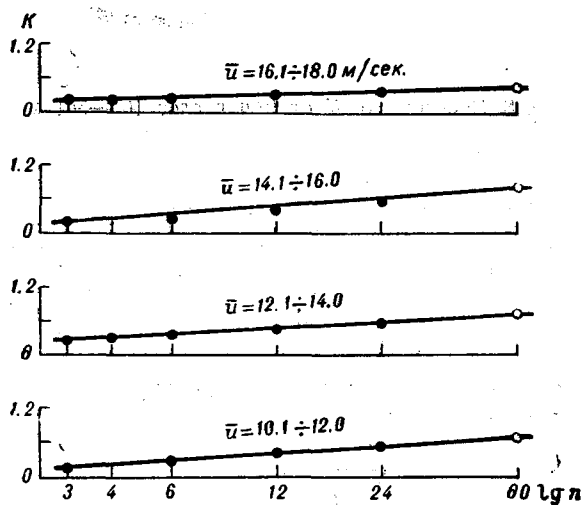


Рис. 7. Зависимость K от $\lg n$ в слое 169—301 м при $\gamma < -2.0$ град/100 м.

порывов на высотных мачтах при различных типах стратификации атмосферы.

Для расчета коэффициентов порывистости при различных значениях средней скорости ветра $\bar{u}$ и вертикального градиента температуры γ в нижних слоях атмосферы использовались непрерывные измерения скорости ветра, проводившиеся на обнинской мачте с:

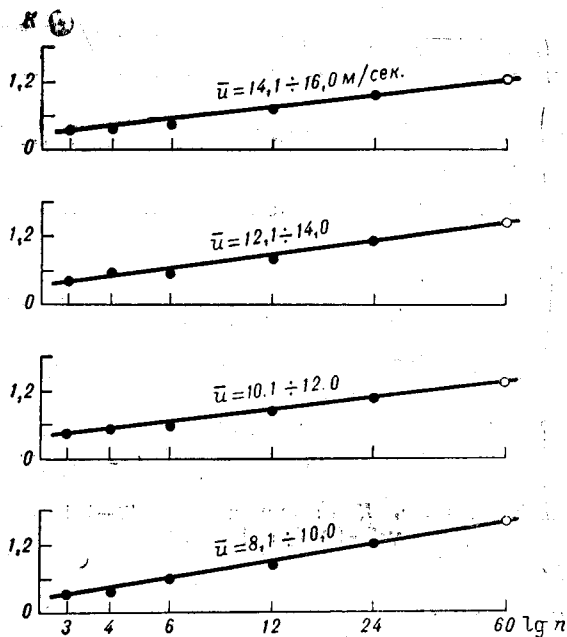


Рис. 8. Зависимость K от $\lg n$ в слое 169—301 м при $-0,2$ град/100 м $< \gamma < 0,6$ град/100 м.

мописцами М-49 за период январь — апрель 1967 г. на высотах 25, 49, 73, 121, 169, 217, 265 и 301 м, когда средняя часовая скорость ветра на высоте 301 м составляла не менее 15 м/сек.

Интервал осреднения скорости ветра самописцами М-49 был равен 2,5 мин. За указанный период общая продолжительность ветра со средней часовой скоростью $\bar{u} \geq 15$ м/сек. на уровне 301 м составила 56 час. Вначале были рассчитаны среднечасовые скорости ветра на указанных высотах и максимальные за каждый час скорости при разных Δt (2,5, 5, 10, 15 и 20 мин). По этим данным определялись коэффициенты порывистости при разных Δt .

Учитывая сравнительно небольшой объем фактического материала, коэффициенты порывистости, рассчитанные для всех уровней, объединялись по слоям. В нижний, приземный, слой вошл

ысоты измерений 8 и 25 м, в средний — 49, 73 и 121 м и в верх-
ий — 169, 217, 265 и 301 м.

По этим послойным значениям K были рассчитаны средние
начения коэффициентов порывистости при различных Δt для каж-
дой градации среднечасовой скорости ветра $\bar{u}$ и среднего верти-
кального градиента температуры γ в слое 300 м.

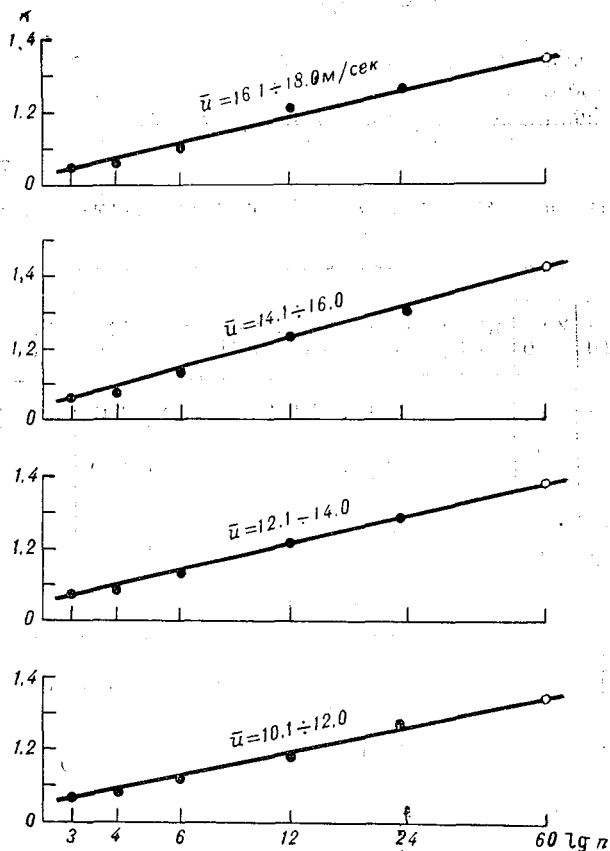


Рис. 9. Зависимость K от $\lg n$ в слое 169—301 м при $\gamma > 0,6$ град/100 м.

Градации скорости ветра и вертикального градиента темпера-
туры выбирались таким образом, чтобы в каждую из градаций
ходило не менее 3 час. наблюдений для нижнего слоя и не менее
час. для среднего и верхнего слоев. В соответствии с этим града-
ции выбирались для нижнего слоя через 1 м/сек., для среднего
верхнего через 2 м/сек. Было выбрано четыре градации γ : более
0,60, от +0,60 до -0,20, от -0,20 до -2,00 и менее -2,00° на 100 м.

Таким образом нами были получены коэффициенты порывистости K_3, K_4, K_6, K_{12} и K_{24} при указанных градациях $\bar{u}$ и γ для нижнего (приземного), среднего и верхнего слоев.

И. Д. Андреевым [5, 6] и Н. П. Голтаревым [37] было показано, что коэффициент порывистости K связан логарифмической зависимостью с числом малых интервалов $\Delta\tau$ внутри периода τ , т.

$$K = C \lg \frac{\tau}{\Delta\tau} = C \lg n,$$

где C — коэффициент пропорциональности.

Указанное соотношение позволяет по полученным данным определить коэффициенты порывистости при $n > 24$.

Таблица

Коэффициенты порывистости ветра K_{60} при различных значениях $\bar{u}$ и
Слой 8—25 м

$\gamma \frac{\text{град}}{100 \text{ м}}$	$\bar{u}$										
	1,1— 2,0	2,1— 3,0	3,1— 4,0	4,1— 5,0	5,1— 6,0	6,1— 7,0	7,1— 8,0	8,1— 9,0	9,1— 10,0	10,1— 11,0	11,1— 12,0
$> +0,60$	—	—	—	—	1,39	1,35	1,40	1,47	1,48	—	1,50
От $-0,20$ до $+0,60$	—	—	—	1,46	1,42	1,35	—	1,52	—	—	—
От $-0,20$ до $-2,00$	1,73	1,55	1,41	1,42	—	—	—	—	—	—	—
$< -2,00$	1,80	1,47	1,36	—	—	—	—	—	—	—	—

Слой 49—121 м

$\gamma \frac{\text{град}}{100 \text{ м}}$	$\bar{u}$					
	2,1—4,0	4,1—6,0	6,1—8,0	8,1—10,0	10,1—12,0	12,1—14,0
$> +0,60$	—	—	1,32	1,46	1,48	1,46
От $-0,20$ до $+0,60$	—	1,41	1,38	1,22	1,23	—
От $-0,20$ до $-2,00$	1,28	1,24	1,18	—	—	—
$< -2,00$	1,34	1,17	1,12	—	—	—

Слой 169—301 м

$\gamma \frac{\text{град}}{100 \text{ м}}$	$\bar{u}$					
	8,1—10,0	10,1—12,0	12,1—14,0	14,1—16,0	16,1—18,0	18,1—20,0
$> +0,60$	—	1,34	1,38	1,42	1,34	—
От $-0,20$ до $+0,60$	1,26	1,22	1,24	1,20	—	—
От $-0,20$ до $-2,00$	1,16	1,22	1,15	1,15	1,15	1,10
$< -2,00$	1,11	1,12	—	1,14	1,07	1,05

С целью проверки возможности аппроксимации величины K логарифмической функцией от n полученные нами величины K_3 , K_4 , K_6 , K_{12} и K_{24} наносились на график в полулогарифмическом масштабе (рис. 6—9). Оказалось, что логарифмическая зависимость коэффициента порывистости K от числа малых промежутков внутри интервала осреднения n достаточно строго выполняется для всех слоев: нижнего (8—25 м), среднего (49—121 м) и верхнего (169—301 м).

На указанных рисунках по оси абсцисс откладывались величины $\lg n$, а по оси ординат — значения K .

Экстраполируя прямые зависимости до $n=60$, получаем отношение максимальной скорости, осредненной за $\Delta t=1$ мин., к среднечасовой скорости, т. е. K_{60} . Указанная величина численно равна отношению максимума скорости ветра за 2 сек. к средней скорости за 2 мин., т. е. представляет собой коэффициент порывистости, наиболее важный для практики.

Правомерность такого перехода от минутных интервалов осреднения к секундным была показана И. Д. Андреевым [6], обработавшим большой материал измерений ветра анемографами Дайнса Кардингтоне.

Полученные коэффициенты порывистости K_{60} при различных адациях среднечасовой скорости u и вертикального градиента температуры γ приведены в табл. 14. Эта таблица позволяет оценить коэффициенты порывистости ветра (K_{60}) при основных видах отложений, наблюдающихся в нижнем 300-метровом слое (зернистая изморозь, смесь, гололед), и при различной средней скорости ветра u в каждом из указанных слоев.

Так как вышеупомянутые виды отложений наблюдаются в основном при градиентах субадиабатических и несколько выше адиабатических, полученные таблицы позволяют сделать вывод, что в самом нижнем слое 8—25 м K_{60} при отложениях гололеда и изморози ($\gamma > +0,6$ град/100 м) изменяется от 1,39 до 1,50 при скорости ветра 5—10 м/сек. В среднем слое (49—121 м) K_{60} изменяется от 1,32 до 1,48 при скорости ветра 6—14 м/сек., в верхнем слое (69—301 м) — от 1,34 до 1,42 при скорости ветра 10—18 м/сек.

Глава III. ИНТЕНСИВНОСТЬ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

§ 1. Состояние вопроса

В настоящей главе не представляется возможным рассмотреть все закономерности и особенности механизма образования различных видов отложений. Поэтому мы ограничимся основными сведениями о процессах нарастания отложений на высотных сооружениях при наличии облаков нижнего яруса и анализом наиболее об-

щих закономерностей влияния водности облаков, скорости ветра и температуры воздуха на интенсивность процесса и структуру отложений.

Хорошо известно, что гололед и изморозь образуются на каких-либо объектах не только в результате замерзания (кристаллизации) переохлажденных капель воды, но и вследствие сублимации водяного пара. Так, например, кристаллическая изморозь, образующаяся в отсутствие тумана или облачности (при радиационном выхолаживании) представляет собой осадок чисто сублимационного происхождения.

Опыты, проведенные в 1937 г. в Тбилисском научно-исследовательском гидроэнергетическом институте, исследования В. В. Бургсдорфа [16] и Ю. Н. Андреева [4] показали, что сублимация водяного пара играет второстепенную роль в образовании отложений и что размеры и структура последних определяются прежде всего процессом замерзания переохлажденных капелек воды. Позднее этот вывод получил подтверждение в работах У. Макклина и Дж. Пэйна [115], П. Мореля, Ж. Фурье и П. Ситбона [116], которые рассчитали скорости нарастания отложений при условии, что они образуются только за счет сублимации. Полученные скорости оказались крайне малыми и несущественными с практической точки зрения.

Одним из важнейших вопросов физики гололедообразования является исследование факторов, определяющих структуру отложений, т. е. вероятность появления гололедных или изморозевых формаций.

А. Р. Вегенер указывал еще в 1911 г., что структура отложения определяется скоростью замерзания капель. При медленном процессе замерзания капля успевает растечься по поверхности предмета, в силу чего образуется однородный ледяной слой, т. е. отложения гололеда с большой плотностью. При быстром замерзании капли почти не меняют своей формы и намерзают друг на друга, в результате чего образуется неоднородное отложение рыхлой структуры, т. е. изморозь с малой плотностью.

Скорость замерзания капель в свою очередь зависит от их размера, температуры воздуха и поверхности предмета, на котором замерзают капли. Следовательно, все эти факторы влияют и на структуру образовавшегося осадка.

П. А. Молчанов [79] полагал, что решающее влияние на структуру отложений оказывает размер капель, в то время как Б. С. Гипонов [31] считал определяющим фактором температуру воздуха. В. В. Бургсдорф [16], Ю. Н. Андреев [4], Л. Г. Качурин [63] указывают, что структура отложения определяется взаимодействием указанных факторов, поэтому выделить решающую роль одного из них весьма затруднительно.

Следует отметить, что интенсивность процесса гололедообразования зависит также от наличия уже отложившегося льда и температуры его поверхности, что было показано В. В. Бургсдорфом [16], У. Макклином и Дж. Пэйном [115].

Кроме упомянутых выше исследователей, вопросами физики гололедообразования занимались А. А. Дмитриев [40, 42], В. Б. Базилевич [7], Н. С. Муретов [80] и др.

Некоторые особенности образования отложений на высотных сооружениях рассматривались в [32, 33, 34, 53, 67, 68]. Однако до настоящего времени проблема исследования физико-метеорологических условий образования различных видов отложений решена далеко не полностью.

Слабо изучены такие аспекты проблемы, как влияние влагосодержания воздуха и скорости ветра на интенсивность нарастания отложений и их структуру, роль температуры воздуха в формировании отложений, изменение интенсивности процесса во времени и т. п.

В особенности это относится к отложениям на высоких сооружениях, образующимся вследствие соприкосновения с ними переохлажденных облачных капель.

§ 2. Интенсивность нарастания отложений

Каждый гололедо-изморозевый период, представляющий собой промежуток времени от начала образования отложения до его полного разрушения, состоит из более мелких периодов нарастания и частичного испарения отложения, в результате чего вес, размеры и структура последнего непрерывно меняются и лишь в отдельные промежутки времени могут оставаться постоянными. Указанные изменения связаны с непрерывными колебаниями значений метеорологических параметров, определяющих характеристики отложения в каждый момент времени.

Процесс гололедообразования на элементах сооружений, расположенных на различных высотах, протекает по-разному. Например, в то время как на одном уровне отложение нарастает, на другом оно может испаряться; на одной высоте отложение уплотняется, а на другой становится менее плотным и т. п.

Изменение характеристик отложения зернистой изморози в облаках нижнего яруса за период 30 января — 3 февраля 1964 г. на высотах 265 и 301 м представлено на рис. 10, 11. Из рисунков видно, что вес, размеры и плотность зернистой изморози в течение указанного периода изменялись достаточно существенно. Так, например, максимальный за период вес отложения на высоте 265 м составлял 725 г/м, а минимальный — 50 г/м. За этот же период диаметр отложения изменился от 10 до 105 мм, а объемный вес — от 0,12 до 0,40 г/см³ (рис. 11).

Важнейшей характеристикой процесса гололедообразования является интенсивность нарастания (испарения) отложений. Величина нарастания (испарения) характеризуется количеством отложившегося (испарившегося) в единицу времени льда, т. е. скоростью роста (испарения) отложений по весу (V_p) и диаметру (V_d).

Скорости роста (испарения) отложений за промежуток времени

между двумя наблюдениями (τ) могут быть рассчитаны по формулам:

$$V_P = \frac{P_2 - P_1}{\tau} \text{ г/м} \cdot \text{час.}, \quad (16)$$

$$V_a = \frac{a_2 - a_1}{\tau} \text{ мм} \cdot \text{час.}, \quad (17)$$

где P_1 и a_1 — вес и диаметр отложения в момент первого измерения; P_2 и a_2 — при последующем наблюдении.

Если $P_2 > P_1$ и $a_2 > a_1$, то $V_P > 0$ и $V_a > 0$, т. е. отложение нарастает. При $P_2 < P_1$ и $a_2 < a_1$, $V_P < 0$ и $V_a < 0$, т. е. отложение испаряется.

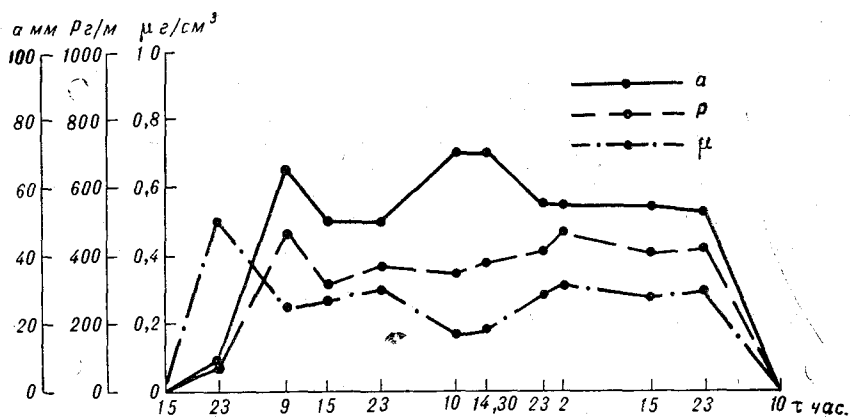


Рис. 10. Изменение веса (P), диаметра (a) и плотности (μ) зернистой изморози на уровне 301 м за период 30 января — 3 февраля 1964 г.

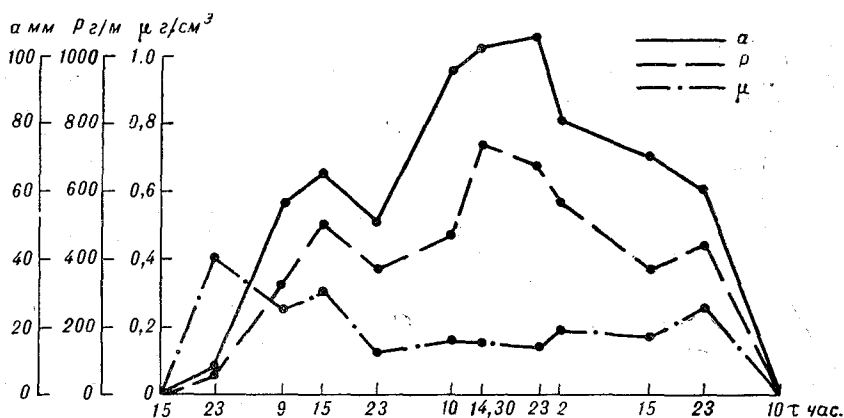


Рис. 11. Изменение веса (P), диаметра (a) и плотности (μ) зернистой изморози на уровне 265 м за период 30 января — 3 февраля 1964 г.

Если $P_2 = P_1$ и $a_2 = a_1$, вес и размеры отложения остаются постоянными (стадия устойчивого состояния).

Если $P_2 > P_1$, а $a_2 < a_1$, отложение становится более плотным. При $P_2 < P_1$ и $a_2 > a_1$ плотность отложения уменьшается.

Так как в начале процесса $P=0$ и $a=0$, величины V_a и V_P за весь период T определяются формулами:

$$V_P = \frac{P_T}{T}, \quad (18)$$

$$V_a = \frac{a_T}{T}. \quad (19)$$

Некоторые данные о скоростях роста и испарения отложений на различных высотах в 300-метровом слое приводились Ф. Я. Климовым [67, 68].

Таблица 15

Средние скорости роста различных видов отложений по весу (г/м·час) и диаметру (мм/час) в облаках нижнего яруса

Высота (м)	Зернистая изморозь			Смесь			Гололед		
	Число случаев	$\bar{V}_P$	$\bar{V}_a$	Число случаев	$\bar{V}_P$	$\bar{V}_a$	Число случаев	$\bar{V}_P$	$\bar{V}_a$
301	52	43	2,0	45	40	3,8	21	36	1,5
265	55	16	1,8	46	13	1,8	24	15	1,2
217	44	11	1,9	30	8	2,0	17	10	1,1

Зависимость указанных величин от метеорологических факторов до настоящего времени не рассматривалась.

Нами были рассчитаны скорости нарастания отложений по формулам (16) — (17).

В табл. 15 приведены средние величины скоростей роста различных видов отложений по весу и диаметру в облаках нижнего яруса. Средние скорости роста веса ($\bar{V}_P$) зернистой изморози, смеси и гололеда мало отличаются друг от друга. Заметно, что

Таблица 16

Максимальные скорости роста различных видов отложений по весу (г/м·час) и диаметру (мм/час) в облаках нижнего яруса

Высота (м)	Зернистая изморозь		Смесь		Гололед	
	V_P max	V_a max	V_P max	V_a max	V_P max	V_a max
301	331	40	116	20	120	7
265	91	13	39	16	53	5
217	38	9	42	13	48	3

с высотой скорости нарастания отложений увеличиваются. Скорости роста диаметра гололеда меньше, чем зернистой изморози и смеси.

Максимальные скорости роста для указанных видов отложений даны в табл. 16. Из таблицы видно, что максимальные скорости роста веса и диаметра отложений весьма велики и на высоте 301 м например, составляют 331 г/м·час и 40 мм/час для зернистой изморози, 116 г/м·час и 20 мм/час для смеси. Характерно, что максимальные скорости роста диаметра гололеда оказываются в 4—8 раз меньшими, чем зернистой изморози и смеси.

§ 3. Статистическая оценка влияния водности облаков и скорости ветра на интенсивность гололедообразования

Как уже указывалось в § 2 главы I, наиболее интенсивно процессы гололедообразования протекают в облаках.

Для более детального анализа этих процессов целесообразно использовать данные о водности облаков. Однако при образовании отложений на различных элементах обнинской мачты, когда они находились в облаках нижнего яруса, водность облаков не изменялась. Поэтому мы воспользовались данными о водности облаков в ближайшем к Обнинску пункте самолетного зондирования — Внуково, которые приводятся в «Физике облаков» [94].

Средние значения водности (w), заимствованные из этой работы, приводятся в табл. 17. Они рассчитаны по данным многочисленных полетов вблизи Москвы.

Таблица 17

Средняя водность w облаков нижнего яруса при различной температуре воздуха в Внуково

		Температура воздуха (°C)					
		—25,0 —20,1	—20,0 —15,1	—15,0 —10,1	—10,0 —5,1	—5,0 —0,1	0,0 +5,0
		St, Sc					
w г/м ³		0,11	0,14	0,20	0,18	0,22	0,27
Число полетов . . .		3	15	83	156	148	48
		Ns, As					
w г/м ³		0,09	0,12	0,17	0,21	0,21	0,13
Число полетов . . .		3	2	11	27	70	35

Пользуясь этой таблицей и зная температуру воздуха, измеренную на обнинской мачте на уровне 301 м, и форму облаков при гололедообразовании, можно определить их среднюю водность.

Оценка влияния водности и скорости ветра на интенсивность нарастания отложений, образующихся в облаках нижнего яруса производилась методом дисперсионного анализа для случая двух

акторного равномерного комплекса [95]. Для этого были составлены комбинационные таблицы. Для каждой градации водности скорости ветра дано по 10 значений скорости роста отложений о весу (табл. 18) и диаметру (табл. 19).

Таблица 18

Скорости роста отложений по весу при различных градациях водности облаков нижнего яруса и скорости ветра (г/м·час)

Скорость ветра (м/сек.)	Водность (г/м³)							
	0,08—0,12		0,13—0,17		0,18—0,22		0,23—0,27	
0—4,0	0,2	2,0	0,5	4,8	18,0	24,6	18,0	5,1
	3,8	1,6	2,1	5,0	22,0	1,3	35,0	4,0
	1,5	3,8	4,6	7,3	5,8	32,8	4,3	120,0
	2,0	10,0	2,6	1,1	1,9	2,1	43,0	27,0
	5,0	1,3	25,8	4,2	1,2	14,4	6,0	6,0
1—8,0	34,4	1,3	12,0	29,0	32,6	16,0	7,3	8,4
	9,7	12,5	7,0	15,0	3,3	3,6	331,0	8,0
	1,4	11,0	5,0	91,0	13,3	5,0	7,2	40,0
	37,5	1,1	20,0	52,0	9,2	10,6	12,5	8,6
	10,0	3,3	6,2	27,0	2,1	48,0	60,0	42,0
1—12,0	0,5	1,8	1,9	26,6	3,6	13,0	140,0	30,0
	7,3	0,8	6,9	4,0	8,5	10,5	7,7	82,0
	11,3	11,8	4,0	29,2	2,8	79,5	29,0	20,0
	1,4	6,7	10,0	31,0	6,7	41,0	56,0	38,6
	12,5	0,2	14,3	60,0	43,8	116,0	52,0	40,0
2,1—16,0	9,1	20,0	5,5	7,6	15,5	42,0	4,0	2,0
	2,0	10,0	36,2	10,0	8,9	120,0	22,0	87,0
	10,3	39,0	80,0	11,0	10,0	37,3	14,3	59,0
	4,0	4,1	4,0	42,0	21,0	4,3	36,5	10,0
	31,0	10,5	3,3	7,2	2,9	80,0	17,4	46,0

В каждом отдельном значении скорости роста отложения по весу V_p и диаметру V_d отражено влияние водности облаков нижнего яруса w , скорости ветра u (средней за период нарастания), размера облачных капель, температуры воздуха и поверхности предмета, на котором оседают и замерзают капли, и других факторов.

Объективной числовой характеристикой влияния всех факторов и их сочетаний, действующих в данный момент на отдельное значение V , может служить $(V_i - \bar{V})$, где $\bar{V}$ — среднее значение V по всей комбинационной таблице.

Аналогично, характеристикой влияния водности облаков нижнего яруса на величину V является отклонение $(\bar{V}_w - \bar{V})$, где $\bar{V}_w$ — среднее значение V при каждой градации водности.

Величина $(\bar{V}_u - \bar{V})$ характеризует влияние скорости ветра на величину V . Здесь $\bar{V}_u$ — среднее значение V при каждой градации скорости ветра.

Таблица 19

Скорости роста отложений по диаметру при различных градациях водности облаков нижнего яруса и скорости ветра (мм/час)

Скорость ветра (м/сек.)	Водность (г/м³)							
	0,08—0,12		0,13—0,17		0,18—0,22		0,23—0,27	
0,0—4,0	0,6	0,1	1,4	1,5	2,2	0,2	1,3	0,2
	0,5	1,7	3,0	0,8	0,2	1,6	0,5	1,7
	0,8	7,0	0,8	1,1	1,0	2,6	3,1	5,0
	1,2	2,5	2,4	1,2	1,1	0,2	0,6	3,5
	0,3	2,2	1,1	0,9	2,5	0,3	0,1	2,5
4,1—8,0	1,5	1,8	1,4	1,9	4,6	0,8	3,2	4,5
	2,2	1,3	5,2	0,6	6,5	3,0	2,3	0,7
	1,0	4,0	1,0	3,0	1,2	0,6	11,0	3,6
	0,2	0,6	0,2	1,2	1,0	4,0	2,2	3,7
	0,8	0,2	0,4	2,4	0,6	1,0	2,0	10,7
8,1—12,0	0,9	0,8	0,3	12,8	1,0	2,4	9,4	6,0
	1,4	4,5	3,3	5,7	0,4	1,6	8,1	5,2
	0,6	1,1	3,0	2,9	0,7	2,7	2,5	8,0
	0,9	0,6	2,3	0,8	0,4	5,2	1,1	4,6
	0,4	1,7	2,5	2,1	2,8	2,2	1,7	2,8
12,1—16,0	0,5	1,4	2,1	4,9	3,3	2,0	1,2	1,5
	1,8	0,2	0,3	1,4	0,8	0,8	0,3	20,0
	1,9	0,1	2,8	6,0	0,8	4,8	0,9	9,0
	1,0	0,1	1,6	3,2	0,2	4,2	1,4	5,0
	3,0	0,1	5,7	0,2	0,8	0,4	16,2	9,3

Суммы квадратов указанных отклонений определяют величину суммарного варьирования V под влиянием данного фактора. Эти суммы вычисляются по формуле

$$S_x = \sum_{i=1}^{n_w n_u m} (V_i - \bar{V})^2, \quad (20)$$

де S_x — суммарное варьирование V под действием всех факторов; n_w и n_u — число градаций водности и скорости ветра, m — число выборок в каждой клетке таблицы.

Суммарное изменение величины V под влиянием водности S_w рассчитывается по формуле

$$S_w = \frac{N}{n_w} \sum_1^{n_w} (\bar{V}_w - \bar{V})^2 = mn_u \sum_1^{n_w} (\bar{V}_w - \bar{V})^2, \quad (21)$$

де $N = n_w n_u m$ — общее число выборок в комбинационной таблице.

Аналогичным образом определялось суммарное изменение величины V под действием скорости ветра:

$$S_u = \frac{N}{n_u} \sum_1^{n_u} (\bar{V}_u - \bar{V})^2 = mn_w \sum_1^{n_u} (\bar{V}_u - \bar{V})^2. \quad (22)$$

Прежде чем приступить к анализу простого двухфакторного комплекса, необходимо установить, имеет ли место взаимодействие между рассматриваемыми факторами. Для этого найдем сумму квадратов отклонений «внутриклеточных» средних $\bar{V}_m$ от общего среднего $\bar{V}$

$$S_m = \sum_1^{n_w n_u m} (\bar{V}_m - \bar{V})^2. \quad (23)$$

Указанная сумма квадратов включает в себя вариации V под действием каждого из факторов (S_w и S_u) в отдельности и вариацию, вызванную взаимодействием этих факторов ($S_{w,u}$):

$$S_m = S_w + S_u + S_{w,u}. \quad (24)$$

Отсюда легко определить варьирование, вызванное взаимодействием между w и u ,

$$S_{w,u} = S_m - S_w - S_u. \quad (25)$$

Величина S_x может быть представлена в виде суммы:

$$S_x = S_m + S_z = S_w + S_{w,u} + S_u + S_z, \quad (26)$$

где S_z — остаточное варьирование, вызванное действием неучитываемых (случайных) факторов.

Для вычисления дисперсий (σ^2) необходимо суммарные варьирования (S) разделить на число степеней свободы a (т. е. число независимых отклонений, по которому вычисляется дисперсия). Степени свободы определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} a_x &= N - 1, & a_w &= n_w - 1, & a_u &= n_u - 1, \\ a_{w,u} &= (n_w - 1)(n_u - 1), \\ a_z &= N - n_w n_u. \end{aligned} \quad (27)$$

Дисперсии вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned}\sigma_x^2 &= \frac{S_x}{a_x} = \frac{S_x}{N-1}, & \sigma_w^2 &= \frac{S_w}{a_w} = \frac{S_w}{n_w-1}, \\ \sigma_u^2 &= \frac{S_u}{a_u} = \frac{S_u}{n_u-1}, & \sigma_{w,u}^2 &= \frac{S_{w,u}}{a_{w,u}} = \frac{S_{w,u}}{(n_w-1)(n_u-1)}, \\ \sigma_z^2 &= \frac{S_z}{a_z} = \frac{S_z}{N-n_w n_u}.\end{aligned}\quad (28)$$

Для проверки значимости взаимодействия между w и u необходимо сравнить отношение $\Theta \frac{\sigma_{w,u}^2}{\sigma_z^2}$ с пограничными показателями достоверности Θ_5 , Θ_1 и $\Theta_{0,1}$, имеющими уровни значимости 5, 1 и 0,1%. Эти величины выбирались из работы Р. А. Фишера [95].

Таблица 20

Оценка влияния водности облаков нижнего яруса и скорости ветра на скорость увеличения веса и диаметра отложений

Источник вариации	S	A	σ^2	Θ	Θ_{Π}			$\frac{\Theta}{\Theta_{\Pi}}$		
					Θ_5	Θ_1	$\Theta_{0,1}$	$\frac{\Theta}{\Theta_5}$	$\frac{\Theta}{\Theta_1}$	$\frac{\Theta}{\Theta_{0,1}}$
Рост веса отложений										
w	20 240	3	6747	5,9	2,7	3,9	5,6	2,2	1,5	1,0
u	5586	3	1952	1,7	2,7	3,9	5,6	0,6	0,4	0,3
z	175 177	153	1145	—	—	—	—	—	—	—
Все факторы .	201 003	159	1258	—	—	—	—	—	—	—
Рост диаметра отложений										
w	220,9	3	73,6	10,4	2,7	3,9	5,6	4,3	2,7	1,8
u	61,6	3	20,5	2,9	2,7	3,9	5,6	1,1	0,7	0,5
z	1076,5	153	7,0	—	—	—	—	—	—	—
Все факторы .	1359,0	159	8,3	—	—	—	—	—	—	—

Нами рассматривается влияние водности облаков и скорости ветра на скорость роста отложений по весу и диаметру.

В первом случае $\frac{\sigma_{w,u}^2}{\sigma_z^2} = \frac{766}{1168} \approx 0,65$, т. е. дисперсия взаимо-

действия меньше остаточной. Во втором случае $\frac{\sigma_{w,u}^2}{\sigma_z^2} = 1,5$, т. е. дисперсия взаимодействия больше остаточной. Однако эта величина меньше пограничного показателя достоверности с уровнем значимости 5% ($\Theta_5=1,94$).

Следовательно, как в том, так и в другом случае взаимодействия между факторами w и u является несущественным. Тогда остаточное варьирование определится выражением

$$S'_z = S_x - S_u - S_w. \quad (29)$$

Число степеней свободы для остатка S'_z равно:

$$a'_z = a_x - a_u - a_w. \quad (30)$$

Соответственно изменится и выражение для дисперсии σ_z^2 :

$$\sigma_z^2 = \frac{S'_z}{a'_z} = \frac{S'_z}{a_x - a_u - a_w}. \quad (31)$$

Результаты анализа двухфакторного комплекса без взаимодействия представлены в табл. 20. В графу $\frac{\theta}{\theta_n}$ указанной таблицы занесены отношения полученных нами показателей достоверности к соответствующим пограничным значениям. Из таблицы видно, что влияние водности облаков нижнего яруса на скорость нарастания веса отложений довольно ощутимо, так как $\frac{\theta_w}{\theta_5} = 2,2$. Влияние скорости ветра почти не прослеживается, поскольку $\frac{\theta_u}{\theta_5} = 0,6$.

Любопытно, что влияние указанных факторов на скорость роста диаметра отложений проявляется более отчетливо. Так, показатель достоверности влияния водности почти в 2 раза превышает пограничную величину с уровнем значимости 0,1%. Влияние скорости ветра менее существенно, так как $\theta_u < \theta_1$.

На рис. 12 и 13 графически представлены зависимости скоростей роста отложений по весу и диаметру от скорости ветра при градациях водности 0,08—0,12 г/м³, 0,13—0,17 г/м³ и 0,18—0,22 г/м³.

Из рис. 13 видно, что рост отложений по весу увеличивается с ростом скорости ветра, достигает максимума при $u = 10 \div 11$ м/сек. и уменьшается при дальнейшем усилении ветра.

Аналогичную зависимость от скорости ветра обнаруживает скорость роста отложений по диаметру (рис. 12), однако величина V_a достигает максимума при меньших значениях скорости ветра (6—8 м/сек).

Характерно, что при $w = 0,08 \div 0,12$ г/см³ зависимость V_p от u становится слабой, величина же V_a при указанной градации водности практически не зависит от скорости ветра.

В заключение следует отметить, что влияние ветра на процесс гололедообразования является чрезвычайно сложным и многообразным. Ветер регулирует количество переносимой влаги, а следовательно, влияет на интенсивность процесса.

От характера обтекания влагонесущим потоком предмета зависит распределение капель по поверхности этого предмета, т. е. в конечном итоге форма образовавшегося отложения и степень охвата им поверхности предмета.

При определенных условиях ветер может способствовать слиянию мелких капель в крупные, и напротив, дроблению крупных капель на более мелкие, содействуя растеканию капель по поверхности предмета и таким образом играет немаловажную роль в формировании структуры отложения.

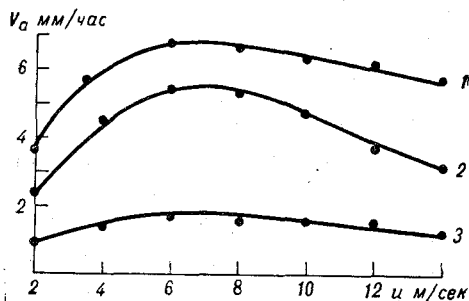


Рис. 12. Зависимость скорости роста отложений по диаметру (V_d) от скорости ветра (u) при различных значениях влажности (w).
1) 0,18—0,22 г/м³, 2) 0,13—0,17 г/м³,
3) 0,08—0,12 г/м³.

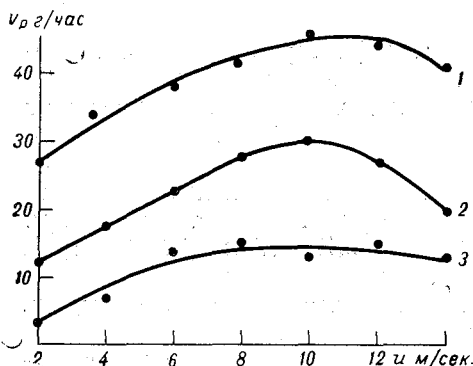


Рис. 13. Зависимость скорости роста отложений по весу (V_p) от скорости ветра (u) при различных значениях влажности (w).
1) 0,18—0,22 г/м³, 2) 0,13—0,17 г/м³,
3) 0,08—0,12 г/м³.

§ 4. Влияние температуры воздуха и скорости ветра на плотность отложений

Как уже указывалось в начале этой главы, время замерзания переохлажденных капель воды различного размера, образующих отложения на каком-либо объекте, определяется температурой поверхности этого объекта и температурой воздуха, а также размером самих капель. Следовательно, все указанные факторы влияют на структуру, а значит и на объемный вес образовавшегося осадка.

Недостаточно освещенным до настоящего времени остается вопрос о влиянии на структуру отложений скорости ветра.

Л. Г. Качурин [63] полагает, что ветер способствует уплотнению отложений, так как под действием ветра капли быстрее растекаются по поверхности предмета; кроме того, мелкие капли могут сливаться в более крупные. В то же время он не исключает возможности того, что наряду с процессом слияния капель под действием ветра

может наблюдаться и дробление крупных капель на более мелкие.

Поскольку зависимость процесса гололедообразования от ветра является весьма сложной, обнаружить зависимость объемного веса отложений от скорости ветра весьма затруднительно. Достаточно убедительных данных, подтверждающих эту зависимость, в настоящее время не имеется. Некоторые данные, полученные

в лабораторных условиях, приводятся У. Макклином и Дж. Пэйном [115]. Они обнаружили, что вентиляция способствует растеканию капель ($r=10\div 40$ мкм) по поверхности предмета до полного их замерзания. При этом оказалось, что при малых размерах капель влияние вентиляции оказывается значительно меньшим.

Зависимость средних значений объемного веса зернистой изморози и смеси от температуры воздуха достаточно хорошо выражается графически. Из рис. 14 видно, что при температуре воздуха от 0 до -16°C зернистая изморозь имеет меньший объемный вес, чем смешанные отложения.

При понижении температуры воздуха от 0 до -5°C объемный вес указанных видов отложений уменьшается, а при дальнейшем изменении температуры практически остается постоянным. Это, по-видимому, объясняется тем, что при температуре ниже указанного предела переохлажденные облачные капли (преобладающий радиус которых составляет 5—15 мкм) замерзают очень быстро

и различия во времени замерзания при температуре, например, -10 и -15°C практически неощутимы. Можно предположить, что для крупных капель (например, частиц осадков, радиус которых достигает нескольких сот микрон) эти различия окажутся гораздо более существенными.

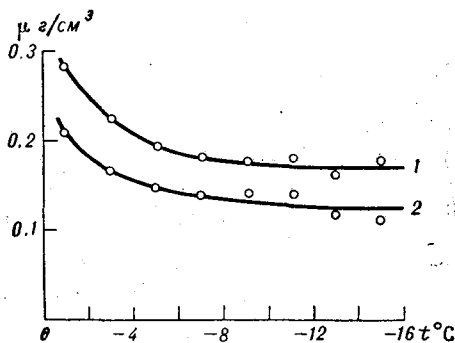
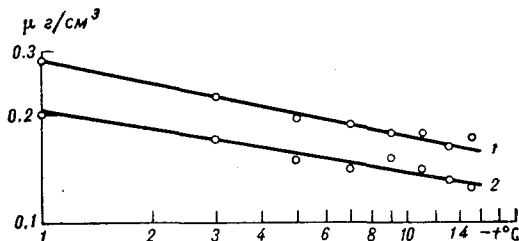


Рис. 14. Зависимость плотности отложений (μ) от температуры воздуха (t).

1) смесь, 2) зернистая изморозь.

Рис. 15. Зависимость плотности отложений (μ) от температуры воздуха (t) в логарифмических координатах.

1) смесь, 2) зернистая изморозь.



Теоретические расчеты и опытные исследования У. Макклина и Дж. Пэйна [115] показали, что с понижением температуры воздуха от 0 до -6°C время замерзания капель ($r=10\div 40$ мкм) быстро уменьшается, а при дальнейшем изменении температуры варьирует незначительно.

Кривые на рис. 14 хорошо спрямляются в логарифмических координатах ($\lg \mu$, $\lg t$). Это видно из рис. 15, на котором по оси абсцисс откладывались в логарифмическом масштабе абсолютные значения отрицательных температур $|t|$, по оси ординат в том же масштабе — средние значения плотности отложений μ .

Следовательно, зависимость объемного веса зернистой изморози и смеси от температуры воздуха можно аппроксимировать степенной функцией вида

$$\mu_t = \mu_0 |t|^{-x}, \quad (32)$$

где μ_t — объемный вес отложения при температуре от -1 до -16°C , μ_0 — при температуре -1°C ; $|t|$ — абсолютное значение отрицательной температуры, x — показатель степени, определяемый по тангенсу угла наклона прямых 1 и 2 (рис. 15).

Подставляя снятые с графика значения μ_0 и x для зернистой изморози и смеси в формулу (32), получаем:

$$\begin{aligned} \mu_t &= 0,28 |t|^{-0,2} \text{ (смесь),} \\ \mu_t &= 0,20 |t|^{-0,2} \text{ (зернистая изморозь).} \end{aligned} \quad (33)$$

Таким образом, используя зависимость вида (32), можно определить объемный вес зернистой изморози и смеси при температуре от -1 до -16°C .

В табл. 21 приводятся средние значения объемного веса зернистой изморози и смеси при различных градациях скорости ветра

Таблица 21

Средние значения объемного веса отложений при различных градациях скорости ветра (г/см^3)

Температура воздуха $^\circ\text{C}$	Скорость ветра (м/сек.)								
	0,1—2,0	2,1—4,0	4,1—6,0	6,1—8,0	8,1—10,0	10,1—12,0	12,1—14,0	14,1—16,0	16,1—18,0
Зернистая изморозь									
От 0,0 до $-5,0$	0,26	0,14	0,20	0,20	0,16	0,16	0,13	0,20	0,27
Число случаев	7	15	10	26	20	14	9	5	2
Ниже $-5,0$	0,15	0,20	0,27	0,18	0,16	0,19	0,12	0,10	—
Число случаев	4	12	26	21	15	16	8	3	—
Смесь									
От 0,0 до $-5,0$	0,40	0,35	0,31	0,28	0,21	0,22	0,38	0,23	—
Число случаев	10	12	12	25	17	21	6	2	—
Ниже $-5,0$	—	0,21	0,22	0,24	0,17	0,22	0,46	0,40	—
Число случаев	—	10	9	23	12	16	8	4	—

для двух градаций температуры воздуха: от 0 до -5 и ниже -5°C .

Из таблицы видно, что закономерной зависимости объемного веса от скорости ветра не обнаруживается.

Для более детального анализа этой зависимости целесообразно использовать данные о микроструктуре облаков нижнего яруса при отрицательной температуре и об изменении распределения капель по размерам в облаках при изменении температуры.

Глава IV. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ ОБЛЕДЕНЕНИЯ ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

§ 1. Основные положения

Проблема расчета гололедных нагрузок на высотные сооружения, расположенные в различных физико-географических условиях, стала особенно важной в последние годы. Однако существующие нормативы по расчету гололедных нагрузок на высотные сооружения (для высот 200, 300 и 400 м) являются грубо ориентировочными и не имеют строгого научного обоснования.

При установлении этих норм использовались систематические данные наблюдений за один сезон наблюдений над гололедом на обнинской мачте, а также некоторые весьма отрывочные данные по другим высотным мачтам; проводился в основном качественный анализ облачности при отрицательной температуре по ряду пунктов.

В настоящее время прямые измерения гололеда на высотных мачтах проводятся только в двух близко расположенных пунктах — Обнинске и Останкино (Москва). Учитывая большую трудоемкость таких наблюдений, трудно предположить, чтобы в ближайшие годы они были организованы во многих пунктах. Поэтому особое значение приобретает разработка косвенных методов расчета гололедных нагрузок, учитывающих аэрологические характеристики облаков при отрицательной температуре: их водность и микроструктуру, скорость переноса, высоту нижней кромки, продолжительность существования и вертикальную мощность.

Для расчета интенсивности обледенения высотных сооружений по указанным характеристикам целесообразно использовать теорию обледенения самолетов, разработанную И. П. Мазиным [74] и Л. Г. Качуриным [64, 65, 66]. Основные положения последней базируются на теории обтекания тел потоком полидисперсного аэрозоля, под которым понимается реальное облако, содержащее капли воды различного размера.

Если известны водность облаков, скорость их переноса и продолжительность существования, а также диаметр провода, то вес отложения, образовавшегося за время τ на 1 пог. м провода, можно рассчитать по формуле, аналогичной той, которую И. П. Мазин

[74] использует для определения интенсивности нарастания корки льда на плоскостях самолета:

$$P = \tilde{E} \beta w u d \tau \cdot \sin \alpha. \quad (34)$$

Здесь P — вес отложения, w — водность облака (кг/м^3), u — скорость ветра (м/сек.), d — диаметр провода (м), τ — продолжительность нарастания (сек.), α — угол между направлением ветра и проводом, $\tilde{E}$ — полный интегральный коэффициент захвата для круглого цилиндра, β — коэффициент намерзания.

Физический смысл и методика расчета параметров $\tilde{E}$ и β для условий обледенения высотных сооружений будут даны ниже.

Величина $m = w u d$ представляет собой массу влаги, переносимую в единицу времени через осевое сечение провода, имеющего длину 1 м, при условии, что ветер направлен перпендикулярно проводу ($\sin \alpha = 1$). Расчеты величины m удобно вести по номограммам (одна из таких номограмм дана на рис. 16), на которых по оси ординат отложены значения массы влаги m , а по оси абсцисс — скорости ветра u .

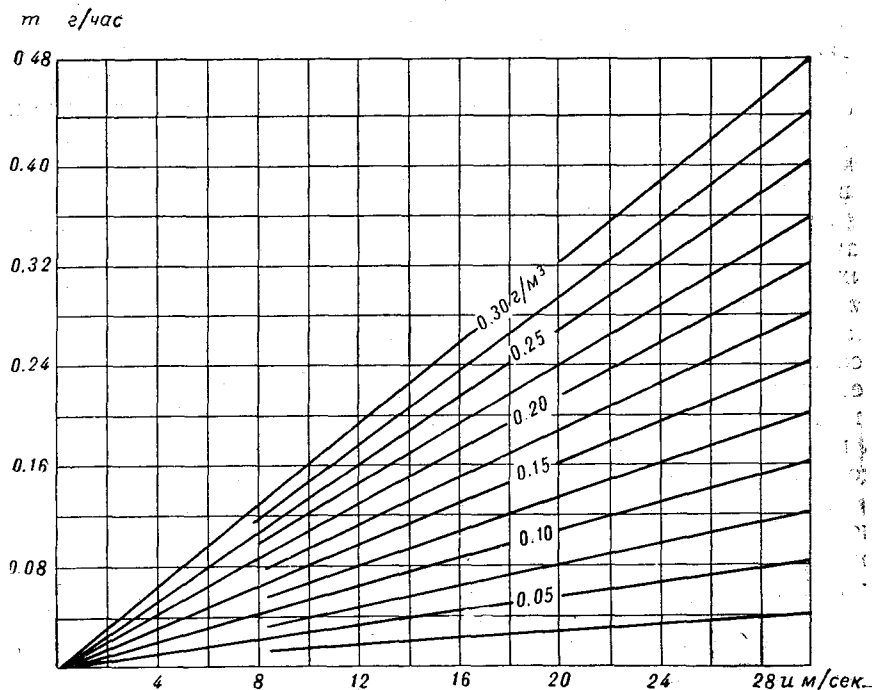


Рис. 16. Зависимость массы влаги ($m = \frac{q}{\tau}$), переносимой в единицу времени через осевое сечение провода диаметром 15 мм от скорости ветра (u) при различных значениях (цифры у кривых) водности (w).

Скорость переноса облаков при отрицательной температуре (u) и продолжительность их существования (τ) над разными районами могут быть оценены по данным радиозондовых наблюдений.

Величину водности w можно оценить по материалам самолетного зондирования. В частности, средние и максимальные величины водности для облаков St, Sc и Ns при различных грациях отрицательной температуры над разными районами даны в [75, 76, 94, 99, 100]. Эти величины определены на основании многочисленных экспериментальных полетов в облаках.

Изменение водности с высотой в облаках различных форм необходимо знать для расчетов интенсивности обледенения элементов сооружений, расположенных на различных высотах.

Данные о средних значениях вертикального градиента водности в облаках St, Sc, Ns и As при отрицательной температуре в зависимости от вертикального градиента температуры в облаках содержатся в [75, 76, 94].

При расчетах количества переносимой влаги не учитывалась сублимация водяного пара, так как роль последней в процессах гололедообразования, как правило, несущественна [16, 115, 116]. Поскольку скорость перемещения облачных капель под действием силы тяжести и вертикальных движений воздуха обычно не превышает 0,1 м/сек., указанные факторы также не имеют практического значения при исследовании процессов образования гололедно-изморозевых отложений.

Наиболее сложной задачей является определение очень важных параметров $\tilde{E}$ и β , входящих в формулу (34) и показывающих, какая часть переохлажденных капель воды, обтекающих провод, участвует в гололедообразовании. Определению указанных величин посвящены последующие разделы этой главы.

§ 2. Расчет полных интегральных коэффициентов захвата для проводов различного диаметра

Величина $\tilde{E}$, называемая полным интегральным коэффициентом захвата, показывает, какой процент облачных капель, обтекающих провод, оседает на нем.

Слово «полный» означает, что коэффициент захвата относится ко всей поверхности тела, а «интегральный», — что величина E интегрируется по всему диапазону радиусов облачных капель.

Вначале необходимо определить полный коэффициент захвата E для какого-либо одного размера капель. Наиболее просто определить величину E для таких элементов сооружений, как провода, тросы, стержни (т. е. рассчитать коэффициент захвата для тел цилиндрической формы).

Из теории обтекания тел потоком аэрозоля известно [71, 73, 96, 100], что коэффициент захвата E является функцией двух без-

размерных параметров — параметра инерции, или числа Стокса (Stk), и числа Рейнольдса для капли (Re_0):

$$Stk = \frac{2r^2 u \rho_v}{9 \eta R}, \quad Re_0 = \frac{2ru}{\nu}, \quad (35)$$

где r — радиус капли (см), u — скорость потока (см/сек.), R — радиус цилиндра (см), η — динамический коэффициент вязкости (г/см/сек. $^{-1}$), ν — кинематический коэффициент вязкости (см 2 /сек.), ρ_v — плотность капли (г/см 3).

Существует так называемое критическое значение параметра Стокса ($Stk_{кр}$), при котором $E=0$. Иными словами, при $Stk < Stk_{кр}$ капли не оседают на поверхности тела, а при $Stk > Stk_{кр}$ оседают.

Л. М. Левин [71] нашел, что при потенциальном обтекании круглого цилиндра $Stk_{кр}=0,125$.

Подставляя в (35) критическое значение параметра Стокса, легко определить критический радиус капель ($r_{кр}$) в зависимости от скорости потока и радиуса цилиндра:

$$\frac{2r_{кр}^2 u \rho_v}{9 \eta R} = 0,125,$$

откуда

$$r_{кр} = 3 \sqrt{\frac{0,125 \eta R}{2u \rho_v}}. \quad (36)$$

По формуле (36) были рассчитаны критические радиусы капель, которые могут оседать на проводе радиусом 1—80 мм при скоростях ветра 1—30 м/сек. Полученные результаты приводятся в табл. 22, из которой видно, что $r_{кр}$ заметно увеличивается с

Таблица 22

Критический радиус капель $r_{кр}$ при различных значениях скорости потока u и радиуса R обтекаемого цилиндра

R мм	Скорость ветра (м/сек.)								
	1	2	3	4	8	12	16	20	30
1	3	2	2	1,5	1	1	1	0,5	0,5
5	7	5	4	3,5	2,5	2	1,5	1,5	1
10	10	7	5,5	4,5	3,5	3	2,5	2	2
15	12	8,5	7	6	4	3,5	3	2,5	2
20	14	10	8	6,5	5	4	3,5	3	2,5
30	17	12	10	8	6	5	4,5	4	3
40	19,5	14	11,5	9,5	7	5,5	5	4,5	3,5
50	22	15,5	12,5	10,5	8	6,5	5,5	5	4
60	24	17	14	11,5	8,5	7	6	5,5	4,5
70	26	18,5	15	12,5	9	7,5	6,5	6	4,5
80	28	20	16	13,5	10	8	7	6,5	5

увеличением размеров обтекаемого цилиндра и столь же заметно уменьшается с увеличением скорости ветра. Так, на цилиндре (проводе) радиусом 10 мм при скорости ветра 1 м/сек. будут оседать только те капли, радиус которых превышает 10 мкм, а при скорости 16 м/сек. — капли радиусом более 2,5 мкм. На 60-миллиметровом проводе при тех же скоростях ветра будут оседать те капли, критический радиус которых в несколько раз больше: при $u = 1$ м/сек. он составляет 24 мкм, а при $u = 16$ м/сек. равен 6 мкм.

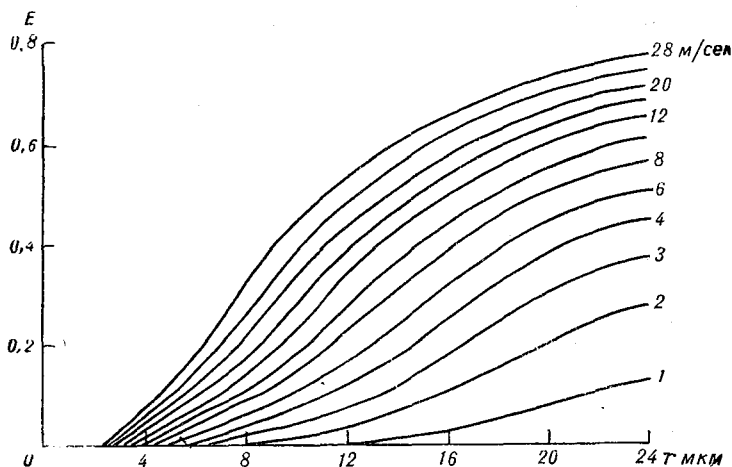


Рис. 17. Зависимость полного коэффициента захвата (E) для круглого цилиндра движения 15 мм от радиуса облачных капель (r) при различных значениях (цифры у кривых) скорости ветра (u).

И. П. Мазин [73, 74], интегрируя уравнения движения капель, обтекающих круглый цилиндр, определил полные коэффициенты захвата E при различных значениях Stk и Re_0 . Результаты расчетов представлены им в виде номограммы, с которой легко снять величину E по значениям Stk и Re_0 .

По номограмме Мазина были определены полные коэффициенты захвата для цилиндрических элементов сооружений диаметром от 5 до 200 мм при скоростях ветра от 1 до 28 м/сек., наиболее часто наблюдающихся при обледенении высотных сооружений. Величины Stk и Re_0 определялись для облачных капель радиусом от 1 до 24 мкм, так как именно в этом диапазоне сосредоточена наибольшая часть капель в нижних и средних частях облаков St , Sc и Ns .

На рис. 17 представлены кривые зависимости E от радиуса капель r при различных скоростях ветра u для круглого цилиндра диаметром 15 мм.

Из рисунка видно, что полный коэффициент захвата E закономерно возрастает с увеличением размеров капель и скорости ветра. Реальное облако всегда полидисперсно, т. е. состоит из капель разного размера. Для учета этого фактора и вводится понятие полного интегрального коэффициента захвата $\tilde{E}$, который согласно [62] определяется выражением

$$\tilde{E} = \frac{3^6}{5! r_{\text{cp}}^6} \int_0^{\infty} r^5 e^{-\frac{3r}{r_{\text{cp}}}} E(r) dr, \quad (37)$$

где r_{cp} — средний радиус капель в облаках.

Практические расчеты величины $\tilde{E}$ наиболее удобно выполнять методом численного интегрирования. Для этого необходимо заметить пределы интегрирования «0» и « ∞ ».

За нижний предел интегрирования возьмем упомянутый выше критический радиус капель $r_{\text{кр}}$, при котором $E(r) = 0$, а за верхний — величину $r = 24$ мкм.

Повторяемость капель $r > 24$ мкм в облаках St, Sc и Ns настолько мала, что вклад их в интегральный коэффициент захвата $\tilde{E}$ практически ничтожен.

С учетом конечных пределов интегрирования формула (37) примет вид

$$\tilde{E} = \frac{3^6}{5! r_{\text{cp}}^6} \int_{r_{\text{кр}}}^r r^5 e^{-\frac{3r}{r_{\text{cp}}}} E(r) dr. \quad (38)$$

Пусть

$$r^5 e^{-\frac{3r}{r_{\text{cp}}}} E(r) = y.$$

Тогда

$$\tilde{E} = \frac{3^6}{5! r_{\text{cp}}^6} \int_{r_{\text{кр}}}^r y dr. \quad (39)$$

Для вычисления интеграла $\int_{r_{\text{кр}}}^r y dr$ промежуток от $r_{\text{кр}}$ до r разбивается на n равных частей, и для каждого r_i вычисляется значение интегрируемой функции $y_i = r_i^5 e^{-\frac{3r_i}{r_{\text{cp}}}} E(r_i)$.

Расчеты велись по широко известной формуле численного интегрирования — формуле Симпсона:

$$\int_{r_{\text{кр}}}^r y dr = \frac{r - r_{\text{кр}}}{3n} (y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + \dots + \\ + 2y_{n-2} + 4y_{n-1} + y_n). \quad (40)$$

Значения интегрируемой функции $y_i = r_i^5 e^{-\frac{3r_i}{r_{\text{ср}}}} (r_i)$ вычислялись через 1 мкм.

Величины $\tilde{E}$, рассчитанные при n и $2n$, совпадали до третьего знака. Таким образом, расчет полных интегральных коэффициентов захвата указанным методом обеспечивает достаточную для практических целей точность.

Как показывает формула (37), полный интегральный коэффициент захвата зависит от среднего радиуса облачных капель $r_{\text{ср}}$.

В работах [15, 94, 99, 100] даны оценки среднего радиуса капель для облаков St, Sc и Ns.

Для нижней части St и Sc величина $r_{\text{ср}}$ принимается равной 4 мкм, для их средней части 4,5 и 4,8 мкм соответственно. Для слоисто-дождевых облаков в целом величина $r_{\text{ср}}$ колеблется от 5 до 7 мкм. Исходя из этого величина E определялась для средних радиусов капель 4, 5, 6 и 7 мкм.

На рис. 18 представлены графики зависимости полного интегрального коэффициента захвата $\tilde{E}$ от радиуса провода R при различных значениях скорости ветра для средних радиусов капель 4 и 5 мкм. Из рисунка видно, что величина $\tilde{E}$ убывает с увеличением диаметра провода (вначале резко, а затем постепенно) и с уменьшением скорости ветра. Сравнение рис. 18 а и 18 б показывает, что с увеличением среднего радиуса капель $r_{\text{ср}}$ величина $\tilde{E}$ закономерно увеличивается.

Таким образом, зная диаметр провода d , скорость ветра u и средний радиус капель $r_{\text{ср}}$, можно определить величину $\tilde{E}$, т. е. ту часть переносимой капельножидкой влаги, которая оседает на проводе за время гололедообразования. Вопрос о том, какая доля осевшей влаги превращается в лед, рассматривается ниже.

§ 3. Определение коэффициента намерзания для условий обледенения высотных сооружений

При изучении процессов обледенения различных объектов [64, 74] считается, что при температуре обледеневающей поверхности ниже нуля замерзает практически вся осевшая на поверхности объекта вода, за исключением той ее части, которая успевает испариться до замерзания. В этом случае, согласно [74], коэффициент намерзания выражается соотношением

$$\beta = 1 - \frac{m_i}{m_{\text{в}}}, \quad (41)$$

где $m_{\text{в}}$ — масса воды, оседающей на поверхности тела в единицу времени; m_i — масса воды, испаряющейся с той же поверхности за то же время.

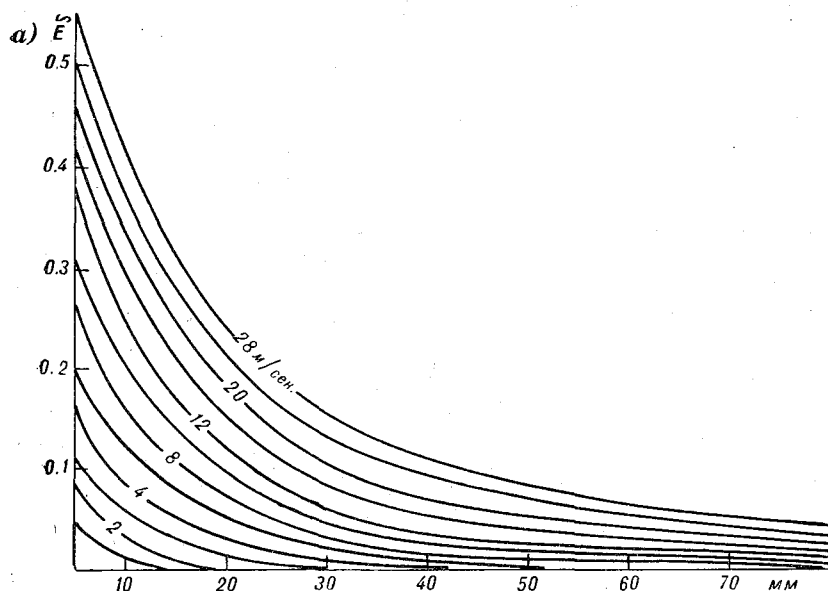


Рис. 18. Зависимость полного интегрального коэффициента
значениях скорости ветра
а) $r_{\text{ср}} = 4$ мкм,

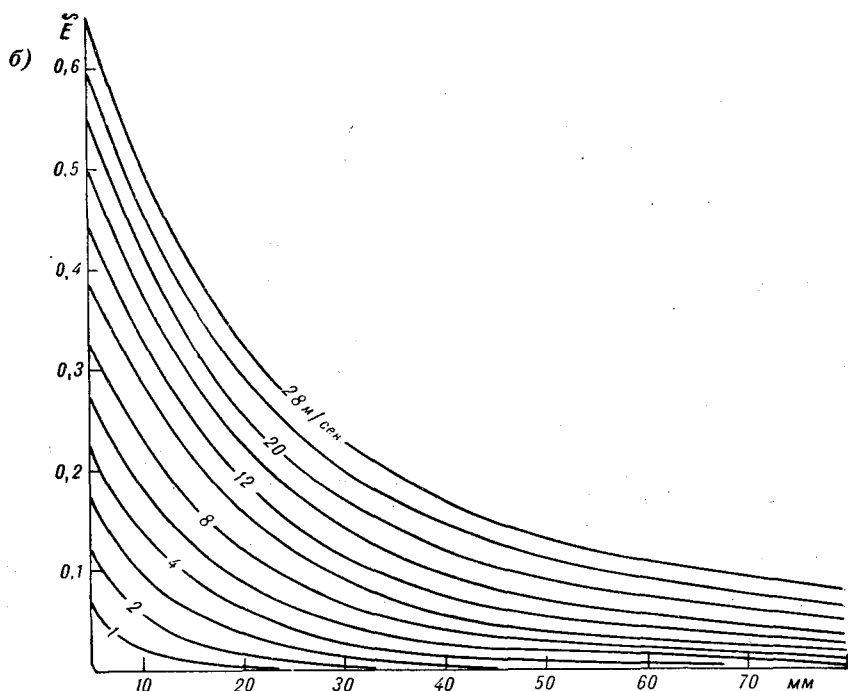
При определении количества воды, замерзающей в единицу времени на единице площади, температура поверхности может достигнуть нулевого значения. Пусть $m_{\text{кр}}$ — то наименьшее количество воды, сталкивающейся с телом в единицу времени, при котором температура обледеневающей поверхности достигает 0° .

По И. П. Мазину [74], при $m_{\text{в}} < m_{\text{кр}}$ коэффициент намерзания β определяется формулой (41), при $m_{\text{в}} > m_{\text{кр}}$ формула для расчета β принимает вид

$$\beta = 1 - \frac{m_i}{m_{\text{в}}} - \left(1 + \frac{t_0}{80}\right) \left(1 - \frac{m_{\text{кр}}}{m_{\text{в}}}\right). \quad (42)$$

Отношение $\frac{m_i}{m_{\text{в}}}$ для условий обледенения высотных сооружений не превышает величину $2 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, в практических расчетах ту часть влаги, которая успевает испариться до замерзания, можно не учитывать. Тогда выражения для коэффициента намерзания (41) и (42) переписутся в виде:

$$\beta \approx 1 \quad \text{при } m_{\text{в}} < m_{\text{кр}},$$



захвата ($\tilde{E}$) от радиуса провода (мм) при различных
(цифры у кривых)
б) $r_{\text{ср}} = 5 \text{ мкм}$

$$\beta \approx 1 - \left(1 + \frac{t_0}{80}\right) \left(1 - \frac{m_{\text{кр}}}{m_{\text{в}}}\right) \text{ при } m_{\text{в}} > m_{\text{кр}}. \quad (43)$$

Эти формулы можно преобразовать, заменив значения $m_{\text{кр}}$ и $m_{\text{в}}$ соответствующими значениями водности облаков $w_{\text{кр}}$ и w :

$$m_{\text{кр}} = w_{\text{кр}} \tilde{E},$$

$$m_{\text{в}} = w \tilde{E}. \quad (44)$$

Тогда из формул (43) и (44) получаем:

$$\beta \approx 1 \text{ при } w < w_{\text{кр}},$$

$$\beta \approx 1 - \left(1 + \frac{t_0}{80}\right) \left(1 - \frac{w_{\text{кр}}}{w}\right) \text{ при } w > w_{\text{кр}}. \quad (45)$$

Таким образом, для определения коэффициента намерзания необходимо знать температуру воздуха t_0 , фактическую водность облака w и величину критической водности $w_{\text{кр}}$, при которой температура обледеневающей поверхности достигает 0° .

Согласно [74], величина $w_{\text{кр}}$ определяется следующей форму-

лой, полученной из уравнений теплового баланса обледеневающей поверхности:

$$w_{кр} = \frac{\alpha \left(-t_0 + \frac{0,628 L_{суб}(e_0 - e_{t_0})}{c_p p_0} - \frac{ru^2}{2Jc_p} \right)}{\tilde{E}u \left(80 + t_0 + \frac{u^2}{2J} \right)}, \quad (46)$$

где α — коэффициент теплоотдачи (кал/см²·сек.·град), c_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении (кал/г·град), p_0 — давление воздуха (мб), J — механический эквивалент тепла (эрг/кал), e_{t_0} — насыщающая упругость водяного пара при температуре воздуха t_0 (мб), e_0 — насыщающая упругость водяного пара при 0° (мб), $L_{суб}$ — скрытая теплота испарения льда при t_0 (кал/г), r — коэффициент восстановления (равный единице при $u < 100$ м/сек.).

Таблица 23

Значения критической водности (г/м³) в зависимости от температуры воздуха t_0 и скорости ветра u ($P_0=1000$ мб, $r_{ср}=5$ мкм)

$t_0^{\circ}\text{C}$	Скорость ветра (м/сек.)										
	1	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24
$d=10\text{ мм}$											
—1	6,92	0,46	0,33	0,19	0,16	0,12	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05
—2	13,34	0,94	0,66	0,38	0,32	0,25	0,20	0,16	0,5	0,14	0,11
—4	27,40	1,94	1,39	0,79	0,65	0,52	0,43	0,34	0,32	0,31	0,25
—6	40,55	2,87	2,02	1,17	0,97	0,78	0,64	0,51	0,48	0,45	0,38
$d=5\text{ мм}$											
—1	5,25	0,38	0,27	0,16	0,13	0,09	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06
—2	10,62	0,76	0,55	0,33	0,26	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,12
—4	22,00	1,58	1,13	0,68	0,54	0,39	0,37	0,35	0,34	0,32	0,25
—6	36,74	2,34	1,67	1,00	0,78	0,57	0,54	0,51	0,48	0,46	0,36

Анализ формулы (46) показывает, что критическая водность $w_{кр}$ зависит главным образом от температуры воздуха t_0 , скорости ветра u , полного интегрального коэффициента захвата $\tilde{E}$ и удельного коэффициента теплоотдачи α .

Для определения величины α обычно используют [38, 39, 78] следующую зависимость:

$$Nu = a Re^n, \quad (47)$$

где $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$ — критерий Нуссельта, характеризующий теплообмен тел со средой; $Re = \frac{ud}{\nu}$ — число Рейнольдса для тела; λ — коэффициент теплопроводности (кал/см·сек.·град.); a и n — эмпирические

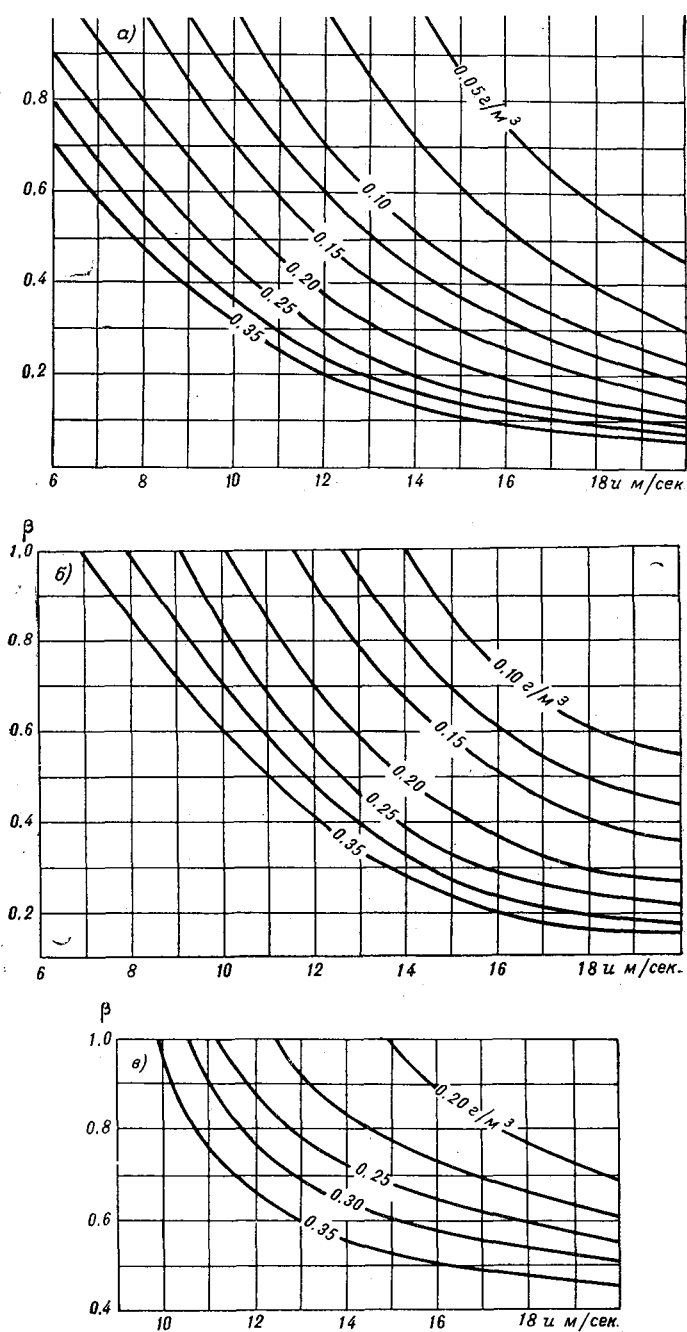


Рис. 19. Зависимость коэффициента намерзания (β) для круглого цилиндра диаметром 40 мм от скорости ветра (u) при различных значениях (цифры у кривых) водности облаков (ω).

($p_0 = 1030$ мб, $r_{cp} = 5$ мкм).

а) $t_0 = -0,25^\circ \text{C}$, б) $t_0 = -0,50^\circ \text{C}$, в) $t_0 = -1,00^\circ \text{C}$.

константы, зависящие от формы тела и Re ; d — диаметр провода (см), u — скорость потока (см/сек.).

Подставляя значения Nu и Re в формулу (47), получаем

$$\frac{\alpha d}{\lambda} = a \left(\frac{ud}{\nu} \right)^n, \quad (48)$$

откуда

$$\alpha = \frac{a \lambda}{d} \left(\frac{ud}{\nu} \right)^n. \quad (49)$$

Коэффициенты a и n для круглых цилиндров при различных значениях Re можно выбрать из таблиц М. А. Михеева [78].

По формуле (46) были рассчитаны величины $\omega_{кр}$ при различных значениях u , t_0 , d и $r_{ср}$. Значения $\omega_{кр}$ для $r_{ср}=5$ мкм и $\rho_0=1000$ мб при d , равном 5 и 10 мм, приводятся в табл. 23. Из таблицы видно, что критическая водность заметно уменьшается с увеличением скорости ветра и с повышением температуры воздуха и что для проводов диаметром 5 и 10 мм уже при $t_0 < -4^\circ\text{C}$ величина $\omega_{кр}$ превышает обычно встречающиеся значения водности в нижних и средних частях St , Sc и Ns . С увеличением диаметра провода критическая водность увеличивается. Расчеты показывают, что для провода диаметром, например, 120 мм величина $\omega_{кр}$ уже при $t_0 < -1^\circ\text{C}$ превышает фактическую водность.

После расчета критической водности нетрудно определить коэффициент намерзания β .

На рис. 19 в качестве примера приведена зависимость коэффициента намерзания β от скорости ветра u при различных значениях фактической водности облаков ω и температуры воздуха. Из рисунка видно, что величина β быстро убывает с увеличением скорости ветра и фактической водности облаков. Характерно, что коэффициент намерзания в значительной мере зависит от температуры воздуха. С понижением последней величина β быстро увеличивается, достигая единицы.

Таким образом, расчеты показывают, что для тонких проводов, тросов и канатов ($d=5 \div 15$ мм) уже при температуре ниже -2°C $\beta=1$, т. е. практически вся капельножидкая влага, осевшая на поверхности высотных сооружений, замерзает. Лишь при скоростях ветра более 16 м/сек. некоторая часть влаги не успевает замерзнуть ($\beta < 1$).

Для круглых цилиндрических элементов диаметром более 60 мм коэффициент намерзания только при температурах, близких к нулю, меньше единицы. В остальных случаях вся влага, осевшая на поверхности тела, замерзает, образуя гололедно-изморозевое отложение.

§ 4. Экспериментальная проверка расчетной формулы

Для проверки расчетной формулы (34) использовались данные измерений гололеда на высотной метеорологической мачте в Обнинске. Тщательный отбор материала привел к тому, что из

Таблица 24

**Опытный расчет гололедных нагрузок для цилиндрических
элементов обнинской мачты**

№ п/п	H м	P кг/м	$w \cdot 10^{-3}$ кг/м ³	μ м/сек.	$\tau \cdot 10^3$ сек.	d м	t_1 °C	t_2 °C	$r_{\text{ср}}$ мм	$\sim E$	β	P_p кг/м	r_p %
1	301	0,42	0,20	13	36	0,02	-9,8	-9,0	5	0,17	1,00	0,36	-14
2	265	0,28	0,20	16	36	0,02	-9,8	-9,0	5	0,18	1,00	0,32	14
3	301	1,30	0,24	15	54	0,10	-0,7	-0,5	7	0,08	0,92	1,40	7
4	301	0,55	0,24	6	16,2	0,14	-0,9	0,0	7	0,02	1,00	0,52	-5
5	265	0,67	0,23	15	54	0,15	-0,9	0,0	5	0,04	0,83	0,57	-15
6	265	0,40	0,21	14	54	0,10	-0,9	0,0	5	0,06	0,75	0,48	20
7	265	0,23	0,24	8	14,4	0,16	-0,5	-0,9	5	0,002	1,00	0,08	-65
8	265	0,12	0,21	7	14,4	0,08	-0,5	-0,9	5	0,02	1,00	0,04	-66
9	301	0,16	0,23	12	14,4	0,06	-2,8	-2,4	7	0,10	1,00	0,19	18
10	301	0,12	0,23	12	10,8	0,08	-2,4	-2,0	7	0,06	1,00	0,13	8
11	301	0,13	0,24	14	43,2	0,10	-2,0	-2,8	5	0,02	1,00	0,20	54
12	301	0,25	0,21	12	16,2	0,06	-1,3	-0,7	4,5	0,04	1,00	0,09	-56
13	301	0,67	0,25	11	46,8	0,06	-0,7	-1,2	7	0,10	1,00	0,74	10
14	301	0,16	0,23	12	14,4	0,05	-2,6	-2,0	7	0,11	1,00	0,22	38
15	265	0,12	0,23	12	10,8	0,07	-2,0	-1,9	5	0,04	1,00	0,07	-41
16	265	0,30	0,20	10	16,2	0,06	-1,3	-0,7	7	0,12	1,00	0,20	-30
17	265	0,42	0,22	8	46,8	0,06	-0,7	-1,2	7	0,08	1,00	0,42	0
18	301	0,14	0,15	9	70,2	0,06	-4,0	-5,0	4	0,02	1,00	0,10	-28
19	301	0,24	0,16	7	18	0,08	-4,0	-5,0	4,5	0,01	1,00	0,02	-91
20	301	0,11	0,18	5	18	0,10	-4,0	-4,8	5	0,01	1,00	0,02	-81
21	301	1,51	0,23	16	66,6	0,06	-3,4	-3,4	7	0,14	1,00	2,08	37
22	301	0,49	0,10	11	151,2	0,10	-10,4	-19,5	4	0,02	1,00	0,26	-47
23	301	0,13	0,22	7	23,4	0,12	-3,4	-2,8	5	0,002	1,00	0,01	-92
24	301	0,25	0,23	12	23,4	0,07	-4,6	-4,3	5	0,04	1,00	0,17	-32
25	301	0,34	0,18	13	36,9	0,02	-10,8	-5,0	5	0,27	1,00	0,35	3
26	301	0,27	0,20	8,5	25,2	0,06	-5,0	-6,4	4	0,03	1,00	0,07	-74
27	301	0,13	0,25	8,5	43,2	0,08	-6,4	-5,1	4,5	0,01	1,00	0,09	-30
28	301	0,48	0,17	5	63	0,08	-8,0	-9,2	5	0,01	1,00	0,04	-91
29	301	1,47	0,19	12	65,6	0,10	-9,2	-3,1	7	0,12	1,00	1,84	25
30	301	0,63	0,24	12	43,2	0,12	-3,1	-1,8	7	0,04	1,00	0,18	-71
31	301	0,68	0,25	12	65,6	0,14	-4,1	-4,1	7	0,03	1,00	0,77	13
32	301	0,16	0,24	5	44	0,02	-6,6	-5,5	4	0,09	1,00	0,07	-56
33	301	0,20	0,18	6	18	0,04	-5,9	-5,9	7	0,06	1,00	0,05	-75
34	301	0,24	0,19	10	10,8	0,02	-5,5	-5,3	7	0,03	1,00	0,01	-8
35	301	0,22	0,22	17	18,7	0,04	-2,9	-2,8	5	0,11	1,00	0,31	41

№ п/п	H м	P кг/м	$w \cdot 10^{-3}$ кг/м ³	u м/сек.	$\tau \cdot 10^3$ сек.	d м	t_1 °C	t_2 °C	$r_{\text{ср}}$ мкм	$\tilde{E}$	β	P_p кг/м	r_p %
36	301	0,42	0,19	17	63	0,06	-2,8	-4,6	4	0,04	1,00	0,48	14
37	265	0,13	0,17	9	70,2	0,04	-4,0	-5,0	4	0,02	1,00	0,12	-7
38	265	0,34	0,14	7	18	0,07	-4,0	-5,0	7	0,04	1,00	0,04	-88
39	265	0,16	0,17	5	23,4	0,08	-5,0	-4,3	5	0,01	1,00	0,01	-93
40	265	0,14	0,18	5	18	0,08	-4,0	-4,8	4	0,01	1,00	0,01	-93
41	265	0,54	0,22	14	65,6	0,04	-3,4	-3,4	5	0,07	1,00	0,63	16
42	265	0,25	0,23	12	23,4	0,06	-1,8	-2,0	5	0,04	1,00	0,16	36
43	265	0,29	0,18	10	39,6	0,02	-10,8	-5,0	4	0,14	1,00	0,14	51
44	265	0,22	0,19	9	25,2	0,06	-5,0	-6,4	5	0,02	1,00	0,05	-77
45	301	1,80	0,24	13	68,4	0,02	-1,2	-2,2	7	0,31	1,00	1,62	-10
46	265	1,44	0,23	13	68,4	0,05	-1,2	-2,2	7	0,14	1,00	1,38	-4
47	301	0,17	0,23	8	18	0,10	-3,2	-3,0	4	0,03	1,00	0,09	-47

шестилетнего периода измерений (1963—1969 гг.) было выбрано всего 47 случаев, пригодных для проверки расчетной формулы.

Выбирались только те случаи, когда уровни измерений (балконы мачты) находились в облаках, а измеренный вес отложения составлял не менее 100 г/м.

Скорость ветра u , диаметр обледенелого провода d , форма облачности и высота ее нижней границы измерялись при наблюдениях над гололедом на мачте (см. главу I, § 1). Так как водность облаков w непосредственно в периоды гололедообразования на мачте не измерялась, для расчетов использовались уже упоминавшиеся ранее (см. главу III, § 2) данные измерений водности для St, Sc и Ns в ближайшем к Обнинску пункте самолетного зондирования — Внуково. Указанные данные имеются в [94].

Средняя высота зондирования St и Sc над Внуково составляла 150—200 м над нижней кромкой облаков. Для того чтобы рассматриваемые уровни измерений гололеда соответствовали высоте зондирования облаков (т. е. той высоте, для которой рассчитаны средние значения водности, приведенные в [94]), выбирались лишь те случаи, когда нижняя кромка St и Sc не превышала 150 м.

Средняя высота, для которой рассчитаны значения водности в Ns составляет 400—600 м. Поэтому для пересчета приведенных в [94] величин водности на высоту измерения гололеда на обнинской мачте использовались средние значения вертикальных градиентов водности в Ns при различной температуре и разной высоте над нижней кромкой облака [75, 76, 94].

Данные расчетов по формуле (34) приведены в табл. 24.

Здесь P — измеренный вес отложения, H — высота измерения, d — диаметр обледенелого провода, t_1 и t_2 — температура воздуха на уровне 301 м (индексы 1 и 2 относятся к первому и второму

измерениям соответственно), u — скорость ветра, τ — время нарастания, $\tilde{E}$ — полный интегральный коэффициент захвата (при данных u и d), β — коэффициент намерзания, P_p — расчетный вес гололеда, $r_p = \frac{P_p - P}{P}$ — относительная погрешность расчета веса отложения.

Из таблицы видно, что в 29 случаях расчетный вес отложения оказался ниже фактического, а в 17 случаях — выше. Величины относительной отрицательной погрешности колеблются от —5 до —93%, положительной — от 3 до 54%.

Заметно, что с увеличением величины веса отложения относительная погрешность уменьшается. Например, в тех случаях, когда фактический вес отложения составлял более 0,5 кг/м, погрешность расчетов веса не превышала 0,37% и лишь в одном случае достигала 0,71%. Средняя относительная положительная погрешность составляет 22%, отрицательная — 41%.

Данные табл. 24 позволяют сделать вывод о том, что расчеты веса гололедно-изморозевых отложений по формуле (34) дают удовлетворительные результаты, особенно при больших значениях веса отложения. Вместе с тем в ряде случаев ошибка определения веса достигает 70—90%. Одной из причин этого является аппроксимация обледенелого провода круглым цилиндром, что далеко не всегда соответствует действительности.

Следует заметить, что при расчетах по формуле (34) для элементов, не покрытых гололедом, необходимость в указанной аппроксимации отпадает и точность расчетов увеличивается.

Еще более существенным источником погрешностей является отсутствие непосредственных измерений водности облаков в периоды гололедообразования на мачте, а также довольно значительные промежутки времени между измерениями, вследствие чего величины водности и скорости ветра, входящие в расчетную формулу, определяются недостаточно точно. С этой точки зрения проверка расчетной формулы по имеющимся экспериментальным данным обнинской мачты является в известной мере ориентировочной. Более строгая проверка могла бы быть выполнена по данным наблюдений, проводимых с достаточной частотой (каждые 2—3 часа) и сопровождаемых непосредственными измерениями водности облаков.

Для расчетов гололедных нагрузок на элементы высотных сооружений, расположенных в различных районах СССР, можно использовать аэрологические характеристики облачности, приведенные в [12, 15, 51, 75, 76, 77, 82, 94].

Глава V. ГОЛОЛЕДНО-ВЕТРОВЫЕ НАГРУЗКИ

Различные элементы высотных сооружений в периоды образования отложений на них испытывают нагрузку от веса отложения и нагрузку от действия ветра.

Действие ветра на сооружения представляет собой сложный процесс, в котором можно выделить статическую часть (действие скорости ветра, осредненной за достаточно большой промежуток времени) и динамическую (действие высокочастотных колебаний скорости ветра, т. е. порывов).

При проектировании сооружений необходимо учитывать совместное воздействие гололеда и ветра, т. е. результирующую гололедно-ветровую нагрузку. В настоящее время учитывается лишь статическая часть этой нагрузки, причем в «Руководящих указаниях по расчету проводов и тросов воздушных линий электропередачи» [87] и «Электротехническом справочнике» [104] рекомендуется вначале рассчитать нагрузку от гололеда и изморози, а затем ветровую нагрузку, которая определяется по максимальной скорости ветра, рассчитанной в отсутствие гололеда.

В «Указаниях по определению гололедных нагрузок СН 318-65» [93] принято нормативную ветровую нагрузку на 1 пог. м обледенелого провода рассчитывать по формуле

$$q_n = c_x \alpha_0 q_0 S, \quad (50)$$

где c_x — аэродинамический коэффициент, принимаемый равным 1 по СНиП, $\alpha_0 = 0,25$ — коэффициент, учитывающий снижение скоростного напора при гололеде, $q_0 = \frac{u_p^2}{16}$ — нормативный скоростной напор (кг/м), u_p — расчетная скорость ветра (м/сек.), возможная один раз в 5 лет, S — площадь проекции покрытого гололедом элемента сооружения, перпендикулярная направлению ветра (для элементов цилиндрической формы — площадь осевого сечения).

Для расчета ветровой нагрузки на высотные сооружения используется та же формула (50) с введением к скоростному напору поправочного коэффициента c_H :

$$q_n = c_H c_x \alpha_0 q_0 S. \quad (51)$$

Коэффициент c_H рассчитан в предположении, что скорость ветра изменяется с высотой по логарифмическому закону при шероховатости $z_0 = 0,08$ м. Значения c_H для высот 100 и 350 м, приведенные в СНиП [91], равны соответственно 2,2 и 3,0.

В «Электротехническом справочнике» [104] и «Руководящих указаниях по расчету проводов и тросов воздушных линий электропередачи» [87] рекомендуется площадь осевого сечения обледенелого провода рассчитывать по толщине стенки гололеда

$$S = (2b + d) l, \quad (52)$$

где d — диаметр провода (м) и $l = 1$ м — его длина; b — толщина стенки гололеда (м).

Однако в действительности, как указывают В. В. Бургсдорф и Н. С. Муретов [17], А. В. Руднева [86], М. В. Заварина и Ц. А. Швер [49], отложения чаще всего имеют в поперечном сечении неправильную форму, более близкую к эллиптической, не-

жели к круговой, и отношение $\frac{c}{a}$ меняется в довольно широких пределах.

Учитывая, что отложения охватывают провод неравномерно, площадь осевого сечения обледенелого провода S целесообразно рассчитывать не по большому (a) или малому (c) диаметру, а по среднему арифметическому $\left(\frac{a+c}{2}\right)$ или среднему геометрическому $\sqrt{ac}$ значению диаметров отложения.

М. В. Завариной и Ц. А. Швер [49] было установлено, что отложения гололеда имеют форму, более близкую к круговой, чем отложения зернистой изморози или смеси. Поэтому Швер [102] было предложено величину S при гололеде рассчитывать по формуле (52), а при зернистой изморози и смеси по среднему арифметическому значению диаметров:

$$S = \frac{a+c}{2} l, \quad (53)$$

где l — длина провода (м).

В (54) было показано, что при расчете ветровой нагрузки на обледенелые провода замена $\sqrt{ac}$ величиной $d+2b$ приводит к занижению нагрузки в 1,5—2 раза при смешанных отложениях и в 2—3 раза при зернистой изморози.

Подставляя (52) и (53) в (51), получаем следующие выражения для расчета нормативной ветровой нагрузки:

при гололеде

$$q_n = c_x c_n \alpha_0 \frac{u_p^2}{16} (2b + d), \quad (54)$$

при зернистой изморози и смеси

$$q_n = c_x c_n \alpha_0 \frac{u_p^2}{16} \frac{(a+c)}{2}. \quad (55)$$

Вес провода вместе с отложением определяется простым суммированием

$$P = P_0 + p, \quad (56)$$

где P_0 — вес отложения, p — вес провода, P — вес отложения с проводом.

Результирующая гололедно-ветровая нагрузка R_n рассчитывается по формуле

$$R_n = \sqrt{P^2 + q_n^2}. \quad (57)$$

Необходимо заметить, что расчет статических гололедно-ветровых нагрузок по данным наблюдений для элементов высотных сооружений до настоящего времени не производился.

Совершенно неосвещенным остается также вопрос о динамической составляющей ветровых нагрузок при гололеде. Поэтому в настоящей главе наибольшее внимание уделено расчету стати-

ческой и оценке динамической составляющих гололедно-ветровых нагрузок. Проведено также сопоставление результирующих нагрузок (статических), рассчитанных с учетом нормативной и измеренной скоростей ветра.

§ 1. Расчет статической части гололедно-ветровых нагрузок по данным наблюдений. Соотношение между весом отложения и ветровой нагрузкой

Расчет гололедно-ветровых нагрузок непосредственно по данным наблюдений представляет значительный интерес, поскольку такие расчеты позволяют сравнить реально наблюдаемые величины нагрузок с нормативными, а также оценить вклад весовой и ветровой составляющих в результирующую нагрузку.

Впервые такие расчеты для воздушных линий электропередачи были выполнены Швер [102]. Она получила значения статических гололедно-ветровых нагрузок для различных марок проводов, применяемых на линиях, и для разных районов гололедности и сопоставила весовую и ветровую части нагрузки при различных скоростях ветра.

В процессе анализа данных об авариях на ЛЭП она сравнивала наблюдавшиеся в этих случаях нагрузки с наибольшими нагрузками для эталонных проводов.

Как уже отмечалось в главе III, § 1, для характеристики ветрового режима при гололедно-изморозевых явлениях в приземном слое используются данные наблюдений по флюгеру. Между тем в периоды образования отложений флюгер подвергается обледенению и поэтому дает заниженные значения действительной скорости ветра. Естественно, что и ветровые нагрузки, рассчитанные по таким данным, будут занижены.

Измерения скорости ветра при гололеде ручными анемометрами, которые выносятся на рабочую площадку непосредственно в сроки наблюдений (как это делается на обнинской мачте), более надежны, чем измерения с помощью стационарных установок (флюгер, автоматические датчики ветра М-49, М-63 и т. д.), подвергающихся обледенению в течение процесса гололедообразования.

Следовательно, расчет ветровых нагрузок при гололеде по данным обнинской мачты позволит получить достаточно надежные результаты.

Для вычисления ветровых нагрузок непосредственно по данным измерений следует в формулах (54) и (55) заменить расчетную скорость (u_p) на измеренную (u) и исключить коэффициент снижения скоростного напора α_0 .

В этом случае формулы (54) и (55) принимают вид:

$$q = c_x \frac{u^2}{16} (2b + d) \text{ при гололеде,} \quad (58)$$

$$q = c_x \frac{u^2}{16} \left(\frac{a + c}{2} \right) \text{ при зернистой изморози и смеси.} \quad (59)$$

Выражение для результирующей нагрузки будет

$$R = \sqrt{P^2 + q^2}. \quad (60)$$

Поскольку при наблюдениях малый диаметр обледенелого провода c не измерялся, для расчета ветровой нагрузки по формулам (58) и (59) мы пользовались средним отношением $\frac{c}{a} = 0,75$, принятым для зернистой изморози и смеси в работах [17, 86, 49]. Это приводит к погрешностям в определении величины S , а следовательно, и ветровой нагрузки q , так как в каждом конкретном случае величина $\frac{c}{a}$ отличается от используемого в расчетах среднего отношения.

Пусть $\frac{c}{a} = \delta$ — заданное отношение диаметров, тогда $c = \delta a$.
 Так как мы используем $\frac{c}{a} = 0,75$, то $c = 0,75a$.

Подставляя $c = \delta a$ и $c = 0,75a$ в формулу (59), получаем:

$$q_{\delta} = c_x \frac{u^2}{16} \frac{a(\delta + 1)}{2}, \quad (61)$$

$$q_{0,75} = c_x \frac{u^2}{16} \frac{1,75a}{2}, \quad (62)$$

где q_{δ} — ветровая нагрузка при $\frac{c}{a} = \delta$, а $q_{0,75}$ — ветровая нагрузка при $\frac{c}{a} = 0,75$.

Формулы (61) и (62) позволяют получить выражение для относительной погрешности определения q :

$$r_q = \frac{q_{0,75} - q_{\delta}}{q_{0,75}} = \frac{0,75 - \delta}{0,75}, \quad (63)$$

где r_q — относительная погрешность определения ветровой нагрузки. По этой формуле можно рассчитать значения r_q при любом δ .

Ниже приводятся относительные ошибки определения ветровой нагрузки при $0,1 \leq \delta \leq 1,0$:

δ . . .	1,00	0,90	0,80	0,75	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10
r_q %	-14	-09	-0,3	0	03	09	14	20	26	32	37

Верхний предел отношения δ равен единице, нижний 0,10, так как, по данным Завариной и Швер [49], величины $\delta \leq 0,10$ наблюдаются крайне редко.

Из приведенных данных видно, что ошибка определения q при $\delta > 0,75$ отрицательна, а при $\delta < 0,75$ положительна. Предельные значения ошибок оказываются равными -14 и $+37$ %.

Учитывая, что наибольшую повторяемость имеет $1,00 \leq \delta \leq 0,50$, можно заключить, что чаще всего ошибка в определении q составляет ± 14 %.

Таким образом, использование среднего отношения $\delta=0,75$ не вносит больших погрешностей в расчет ветровой нагрузки. Ветровая нагрузка при гололеде рассчитывалась по формуле (58), а при зернистой изморози и смеси — по формуле (59).

Вес стандартного горизонтального стержня, применяемого для наблюдений над гололедом, равен 1,38 кг/м.

Таблица 25
Максимальные за период
1963—1968 гг. нагрузки
на стандартных
горизонтальных стержнях

Высо- та (м)	Нагрузка (кг/м)		
	q	P_0	R
73	0,11	0,32	1,72
121	0,91	1,50	2,90
169	0,81	1,84	3,25
217	0,98	1,67	3,05
265	1,50	2,44	4,05
301	2,67	4,42	6,32

Вес отложения в кг/м, определяемый при наблюдении, характеризует гололедную нагрузку. Вес стержня вместе с отложением определялся по формуле (56), а результирующая гололедно-ветровая нагрузка — по формуле (57), в которую вместо q_n подставляется значение q .

Таблица 26
Статические нагрузки на вертикально ориентированные
элементы мачты

H м	P_0 кг/м	a мм	u м/сек.	$c_x q_0$ кг/м ²	S м ²	q кг/м	q/P_0
301	6,40	200	8	4,80	0,18	0,86	0,16
	6,67	210	8	4,80	0,18	0,86	0,14
	10,35	225	1	0,07	0,20	0,02	0,002
	17,35	275	11	9,07	0,24	2,17	0,25
310	10,88	245	8	4,80	0,21	1,00	0,09
	13,00	255	8	4,80	0,22	1,06	0,08

Результаты расчетов сведены в таблицы (см. приложение I). Практический интерес прежде всего представляют максимальные измеренные значения гололедной, ветровой и результирующей нагрузок (табл. 25).

Из таблицы видно, что ветровая нагрузка растет с высотой несколько быстрее, чем вес отложения. Характерно, что на каждом уровне максимальный вес отложения превосходит по величине максимальную ветровую нагрузку. Результирующая нагрузка в слое 200—300 м достигает значительных величин, от 3,05 до 6,32 кг/м.

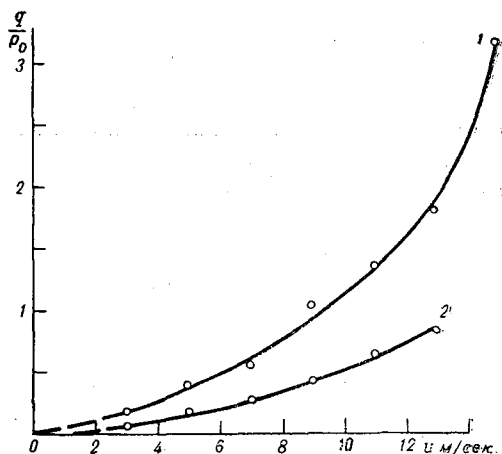


Рис. 20. Зависимость отношения q/P_0 от скорости ветра (u).

1) $P_0 < 1$ кг/м, 2) $P_0 > 1$ кг/м.

Большой практический интерес представляют гололедные и гололедно-ветровые нагрузки, действующие на вертикально ориентированные элементы мачты (тросы, рей). Величины этих нагрузок даны в табл. 26.

Таблица показывает, что при значительных отложениях зернистой изморози и смеси (от 6,4 до 17,13 кг/м) на вертикально ориентированных элементах ветровая нагрузка была невелика (от 0,02 до 2,17 кг/м) и составляла всего 8—25% веса отложения.

Для определения соотношения между весом отложения и ветровой нагрузкой в каждом случае определялась величина q/P_0 (см. приложение I).

Повторяемость указанных отношений в слое 73—301 м следующая:

q/P_0	менее 0,9	0,9—1,1	более 1,1
Процент	59	8	33
Число случаев	129	18	71

Как видим, в 59% случаев ветровая нагрузка была меньше гололедной, а в 33% случаев превышала последнюю. В 8% случаев ветровая нагрузка и вес отложения были одинаковыми. Зная распределение q/P_0 , можно качественно оценить сравнительный вклад величин q и P_0 в результирующую нагрузку R . Учитывая, что вес отложения P_0 суммируется с весом провода p , из приведенных

данных можно заключить, что во всех случаях, когда $q \leq P_0$ (т. е. 67%), вклад величины P_0 будет бóльшим.

Вклад скорости ветра в результирующую нагрузку в большинстве случаев был невелик (менее 5%) и даже при больших ее значениях не превышал 20—30%:

$\frac{P}{R} \%$	70	70—79	80—89	90—95	95
Число случаев	—	1	9	30	178

Это объясняется довольно значительным собственным весом стержня, на котором измерялись отложения ($p=1,38$ кг/м). Кроме того, следует заметить, что площадь осевого сечения (S) обледенелых проводов, тросов, канатов (а в данном случае стержней) во-

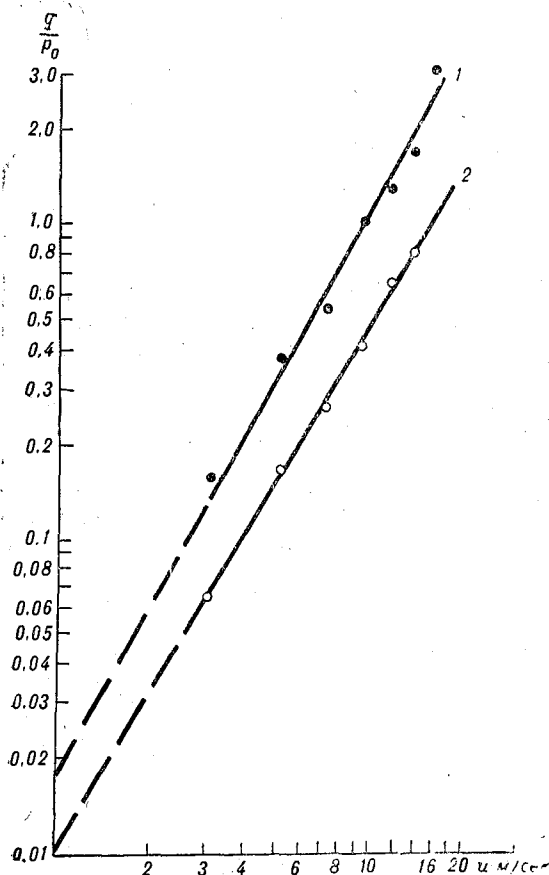


Рис. 21. Зависимость отношения q/P_0 от скорости ветра (u) в логарифмических координатах.
1) $P_0 < 1$ кг/м, 2) $P_0 > 1$ кг/м.

обще невелика и лишь в исключительных случаях достигает 0,2—0,3 м². Для элементов высотных сооружений, обладающих значительной парусностью (обледенелые ажурные конструкции, трубы большого диаметра и т. п.), вклад скорости ветра в результирующую нагрузку будет более существенным.

С увеличением скорости ветра отношение q/P_0 закономерно возрастает (рис. 20). Указанная зависимость в логарифмических координатах изображается в виде прямой (рис. 21). Следовательно, зависимость отношения q/P_0 от скорости ветра можно аппроксимировать степенной функцией вида

$$\left(\frac{q}{P_0}\right)_u = \left(\frac{q}{P_0}\right)_0 u^s. \quad (64)$$

Величина $(q/P_0)_0$ определяется экстраполяцией графика зависимости в логарифмических координатах до $u=1$ м/сек.; s — показатель степени, равный тангенсу угла наклона прямой в указанных координатах.

Подставляя снятые с рис. 21 значения $(q/P_0)_0$ и s в формулу (64), получаем:

$$\left(\frac{q}{P_0}\right)_u = 0,02 \cdot u^{1,8} \quad (P_0 < 1 \text{ кг/м}), \quad (65)$$

$$\left(\frac{q}{P_0}\right)_u = 0,01 \cdot u^{1,8} \quad (P_0 > 1 \text{ кг/м}). \quad (66)$$

Таким образом, используя зависимость вида (64), для заданной скорости ветра можно оценить соотношение между гололедной и ветровой нагрузками, даже не имея данных о размерах и весе отложения.

§ 2. Сравнение нормативных нагрузок с нагрузками, рассчитанными по данным наблюдений. Оценка динамической составляющей гололедно-ветровой нагрузки

Как указывалось в § 1 настоящей главы, нормативная ветровая нагрузка при гололеде на заданной высоте H рассчитывается по формуле (51).

Выражение для расчета ветровой нагрузки по данным наблюдений имеет следующий вид:

$$q = c_x \frac{u^2}{16} S. \quad (67)$$

Нормативная скорость ветра при гололеде на высоте H

$$u_n = u_p \sqrt{c_n} \sqrt{\alpha_0}. \quad (68)$$

Заменяя в формуле (51) $u_p^2 = c_n \alpha_0 u_n^2$, где u_n — нормативная скорость ветра при гололеде на высоте H , получаем

$$q_n = c_x \frac{u_n^2}{16} S. \quad (69)$$

Из формул (67) и (68) следует, что для сравнения величин q и q необходимо прежде всего сопоставить нормативную (u_n) и измеренную (u) скорости ветра.

Расчетную скорость u_p у поверхности Земли, возможную один раз в пять лет, для района Обнинска определим по данным ближайших станций — Калуги и Жиздры, так как в самом Обнинске метеорологическая станция имеет короткий ряд наблюдений.

Согласно [3, 90], расчетные скорости, возможные один раз в пять лет, для Калуги и Жиздры будут равны соответственно 2 и 22 м/сек.

Как указывалось выше, поправочные коэффициенты к скорости напора c_n для высот 100 и 350 м равны 2,2 и 3,0; отсюда величины $\sqrt{c_n}$ для указанных высот составят 1,49 и 1,73. Значения поправочных коэффициентов к скорости ветра $\sqrt{c_n}$ для промежуточных высот определяются линейной интерполяцией.

Таким образом, зная величины u_p , α_0 и $\sqrt{c_n}$, по формуле (68) можно определить нормативные скорости ветра при гололеде на любой высоте.

Приведем нормативные скорости ветра при гололеде на различных высотах в слое 100—300 м:

H м	121	169	217	265	301
u_n м/сек.	16,5	17,0	17,6	18,2	18,6

Совершенно очевидно, что при малых скоростях ветра, которые часто наблюдаются при больших отложениях, нормативная ветровая нагрузка q_n будет в десятки раз превышать ветровую нагрузку q , вычисленную по данным наблюдений.

Наиболее важным для практики является вопрос о том, как часто при гололеде наблюдаются скорости ветра, близкие к нормативным либо превышающие последние.

М. В. Заварина и М. М. Борисенко [50], анализируя данные наблюдений над гололедом и ветром на обнинской мачте за сезон 1963-64 г., обнаружили, что за указанный сезон в слое 200—300 м только однажды, на высоте 265 м, наблюдалась скорость ветра равная нормативной.

Анализ материалов наблюдений за 5 лет (1963—1968 гг.) показал, что за указанный период на высотах 121, 169 и 217 м скорости ветра, равные нормативным либо превышающие таковые не наблюдались. Максимальные измеренные скорости на этих уровнях не превышали 14, 15 и 14 м/сек. соответственно. За этот же период на высотах 265 и 301 м четыре раза наблюдались скорости ветра, практически равные нормативным (табл. 27).

Из таблицы следует, что на высотах 265 и 301 м по одному разу наблюдались скорости ветра, превышающие нормативные. Кроме того, на уровне 301 м два раза наблюдались скорости, близкие к нормативным. Следует отметить, что в трех случаях вес отложения составлял не более 0,1 кг/м. Ветровая нагрузка при этом

е превышала 0,73 кг/м. Только в одном случае вес отложения был равен 0,65 кг/м и ветровая нагрузка достигала 2,67 кг/м.

Таким образом, принятые в настоящее время нормативные значения скорости ветра при гололеде на разных уровнях не занижают ветровую нагрузку при наличии отложений гололеда и изморози на высотных сооружениях.

Таблица 27
Вес отложения и ветровая нагрузка
при $u \approx u_H$

H м	u м/сек.	u_H м/сек.	P_0 кг/м	a мм	q кг/м
265	18,0	17,6	0,10	95	0,73
301	18,0	18,6	0,08	38	0,73
	18,0	18,6	0,65	120	2,67
	19,0	18,6	0,05	23	0,50

Интересно сопоставить результирующие гололедно-ветровые нагрузки, рассчитанные по формулам (67) и (69), т. е. с учетом нормативной u_H и измеренной u скоростей ветра.

Результаты сравнения приведены в приложении II и ниже:

$\frac{R_H}{R}$ %	менее 10	10—25	26—50	более 50
Число случаев	31	109	51	16

Как видим, в 109 случаях нормативная результирующая нагрузка (R_H) превышала рассчитанную по данным наблюдений (R) на 6—25%, а в 51 случае — на 26—50%. В 31 случае результирующие нагрузки, вычисленные по формулам (67) и (68), оказались практически равными. При малых скоростях ветра (16 случаев) нормативная гололедно-ветровая нагрузка (R_H) превышала фактическую (R) более чем на 50%.

В заключение рассмотрим динамическую составляющую гололедно-ветровой нагрузки.

Насколько важно для практики рассчитать или хотя бы оценить динамическую составляющую, уже говорилось в начале настоящей главы. Динамическая составляющая результирующей нагрузки определяется пульсационной компонентой ветровой нагрузки, вызываемой порывами ветра.

Исходными данными для расчета динамической составляющей гололедно-ветровой нагрузки являются коэффициенты порывистости ветра, рассчитанные по данным наблюдений в отсутствие гололедно-изморозевых явлений для различных значений вертикаль-

ного температурного градиента γ и средней скорости ветра $\bar{u}$ и приведенные в табл. 14.

Так как именно эти величины определяют порывистость ветра в данном пункте, было сделано допущение, что при заданных значениях γ и $\bar{u}$ коэффициенты порывистости будут одинаковыми как при наличии, так и при отсутствии гололедно-изморозевых отложений.

Полученные коэффициенты порывистости представляют собой соотношение максимальной скорости в двухсекундном порыве $u_{\max}$ и скорости $\bar{u}$, осредненной за двухминутный интервал времени:

$$K_{60} = \frac{u_{\max}}{\bar{u}} = \frac{u_{\Delta\tau}}{u_{\tau}}, \quad (70)$$

где $\Delta\tau=2$ сек., $\tau=2$ мин. и $n = \frac{\tau}{\Delta\tau} = 60$.

Представим максимальную скорость ветра в порыве $u_{\max}$ в виде средней скорости $\bar{u}$ и пульсационной составляющей u' :

$$u_{\max} = \bar{u} + u'. \quad (71)$$

Тогда для ветровой нагрузки получим соответственно выражение

$$q_{\max} = \bar{q} + q', \quad (72)$$

где $q_{\max}$ — ветровая нагрузка, определяемая максимальной скоростью ветра в порыве, а q' — динамическая компонента ветровой нагрузки.

$$q_{\max} = c_x \frac{u_{\max}^2}{16} S = c_x \frac{\bar{u}^2 K_{60}^2}{16} S = \bar{q} K_{60}^2. \quad (73)$$

Здесь $\bar{q}$ — средняя ветровая нагрузка, определяемая средней скоростью ветра,

$$\bar{q} = c_x \frac{\bar{u}^2}{16} S. \quad (74)$$

Зная $q_{\max}$ и $\bar{q}$, из формул (72) — (74) можно определить динамическую составляющую ветровой нагрузки:

$$q' = q_{\max} - \bar{q} = \bar{q}(K_{60}^2 - 1). \quad (75)$$

Результирующие нагрузки рассчитывались по формулам:

$$R_{\max} = \sqrt{P^2 + q_{\max}^2}, \quad (76)$$

$$\bar{R} = \sqrt{P^2 + \bar{q}^2}, \quad (77)$$

$$R' = R_{\max} - \bar{R}. \quad (78)$$

Коэффициенты порывистости K_{60} выбирались из табл. 14 настоящей работы по известному значению вертикального градиента температуры γ и средней скорости ветра.

Результаты расчетов по формулам (72)—(78) даны в приложении III.

Как видно из таблиц приложения, максимальная ветровая нагрузка $q_{\max}$ изменяется в пределах 0,23—3,98 кг/м, а динамическая составляющая ветровой нагрузки q' — в пределах 0,15—1,59 кг/м.

Максимальная результирующая нагрузка $R_{\max}$ колеблется в пределах 1,45—6,96 кг/м, а динамическая компонента результирующей нагрузки R' составляет 0,01—2,02 кг/м.

Интересно сопоставить динамические составляющие ветровой q' и результирующей R' нагрузок со средними значениями указанных нагрузок $\bar{q}$ и $\bar{R}$. Ниже приводятся результаты сравнения:

$\frac{q'}{\bar{q}}$ %	25—50	51—75	более 75	
Число случаев	19	15	78	
$\frac{R'}{\bar{R}}$ %	менее 5	5—15	16—25	более 25
Число случаев	25	71	11	5

В большинстве случаев пульсационная добавка q' к средней ветровой нагрузке $\bar{q}$ составляет более 75%.

Следует отметить, что в некоторых случаях динамическая составляющая превышает среднюю ветровую нагрузку и отношение $q'/\bar{q}$ достигает 118—133%.

Из приведенных данных также видно, что чаще всего порывы ветра увеличивают среднюю гололедно-ветровую нагрузку на 5—15%.

В 25 случаях пульсационная добавка к статической результирующей нагрузке оказалась незначительной (менее 5%).

Максимальное отношение $R'/\bar{R}$ не превышает 30%.

Выводы

Анализ результатов выполненной работы позволяет сделать ряд выводов об общих закономерностях процессов образования отложений на высотных сооружениях, а также дать некоторые рекомендации по улучшению методики наблюдений над гололедом на высотных мачтах и расчету гололедных и гололедно-ветровых нагрузок на высотные сооружения.

1. Важнейшим фактором, определяющим интенсивность процессов гололедообразования на высотных сооружениях, являются облака нижнего яруса. Со слоистыми облаками чаще всего свя-

зано образование зернистой изморози и смеси, которые являются преобладающими видами отложений в нижнем 300-метровом слое атмосферы. Гололед чаще наблюдается в слоисто-дождевых облаках, поскольку последние являются более крупнокапельными, чем слойные и слоисто-кучевые облака.

2. Зернистая изморозь и смесь в нижнем 300-метровом слое наблюдается главным образом при температуре от -4 до -8°C а гололед — при температуре от 0 до -4°C .

3. Плотность зернистой изморози и смеси увеличивается с высотой, и ее средние значения в слоях 100—200 и 200—300 м составляют $0,14$ — $0,17$ г/см³ для зернистой изморози, $0,18$ — $0,24$ г/см³ для смеси соответственно.

При понижении температуры воздуха от 0 до -4°C плотность зернистой изморози и смеси уменьшается, а при дальнейшем понижении температуры изменяется весьма мало. Зависимость плотности этих видов отложений от температуры воздуха аппроксимируется степенной функцией с показателями степени: $-0,2$ для смеси и $-0,16$ для зернистой изморози. Для более полного исследования структуры отложений, образующихся на высотных сооружениях, целесообразно использовать данные о микроструктуре облаков нижнего яруса при отрицательной температуре.

4. Для измерения скорости ветра в периоды гололедообразования следует использовать вместо стационарных датчиков ручные анемометры. В целях тщательного исследования влияния ветра на образование отложений наблюдения над гололедом следует проводить на всех сторонах рабочих площадок высотных мачт (наветренной, подветренной и боковых).

5. На вертикальных элементах высотных сооружений образуются значительно большие по величине отложения, чем на горизонтальных. Поэтому при проектировании сооружений целесообразно гололедные нагрузки рассчитывать для тех и других элементов отдельно. Для уточнения соотношения между нагрузками на горизонтальные и вертикальные элементы следует проводить систематические измерения отложений на тех и других элементах одновременно.

6. Логарифмическая зависимость коэффициента порывистости ветра от числа малых промежутков времени внутри интервала осреднения скорости, полученная И. Д. Андреевым для приземного слоя, достаточно хорошо выполняется и в рассматриваемом 300-метровом слое.

7. Процессы образования отложений в приземных туманах и в облаках нижнего яруса чаще всего протекают независимо друг от друга. Поэтому расчет интенсивности гололедообразования на высотах более 100 м по наземным данным представляется неоправданным. Более точно можно оценить интенсивность гололедообразования на указанных высотах по данным о водности и микроструктуре облаков при отрицательной температуре, скорости переноса и продолжительности существования этих облаков над различными районами.

8. При слабом ветре (до 1—3 м/сек.) на цилиндрических элементах сооружений диаметром более 50 мм могут оседать только отдельные крупные облачные капли диаметром более 12,5 мкм. На тонких проводах, тросах и канатах (диаметром менее 10 мм) при скорости ветра 16—20 м/сек. могут оседать и мелкие капли радиусом менее 2 мкм.

9. Полный интегральный коэффициент захвата (доля оседающей влаги) заметно убывает с увеличением диаметра провода и возрастает с увеличением скорости ветра и среднего радиуса облачных капель. Величина коэффициента захвата изменяется от тысячных долей процента при слабом ветре и больших размерах обтекаемого провода до 60—80% при очень сильном ветре и тонких проводах.

10. Коэффициент намерзания (процент замерзающей влаги по отношению к осевшей) быстро уменьшается с увеличением скорости ветра, водности облаков и с повышением температуры воздуха.

Практически уже при температуре воздуха ниже -2°C и скорости ветра менее 16 м/сек. вся влага, оседающая на поверхности тонких проводов, тросов и канатов, превращается в лед. Для проводов диаметром более 60 мм коэффициент намерзания становится равным единице уже при температуре -1°C .

11. Результирующая гололедно-ветровая нагрузка на такие элементы сооружений, как провода, тросы, канаты и т. п., определяется главным образом весовой составляющей, и даже при больших скоростях доля ветровой нагрузки не превышает 20—30%. Для элементов, обладающих значительной парусностью (обледенелые ажурные конструкции, трубы большого диаметра и т. п.), вклад скорости ветра в результирующую нагрузку будет более существенным.

12. Динамическая компонента ветровой нагрузки при гололеде в среднем составляет 60% статической части последней и увеличивает результирующую гололедно-ветровую нагрузку на 10—15%. Помимо расчета динамической составляющей гололедно-ветровой нагрузки, практически важно исследовать возможные изменения периода собственных колебаний высотных сооружений в тех случаях, когда последние подвергаются интенсивному обледенению.

**Статические гололедно-ветровые нагрузки на различных высотах
в слое 73—301 м**

Номер п/п	H м	P_0 кг/м	P кг/м	a мм	u м/сек.	q_0 кг/м ²	S м ²	q кг/м	$\frac{q}{P_0}$	R кг/м
1	169	0,30	1,68	27	12	10,80	0,02	0,22	0,73	1,70
2	217	0,43	1,81	45	13	12,67	0,04	0,51	1,19	1,88
3	265	0,78	2,16	55	13	12,67	0,05	0,63	0,81	2,25
4	301	0,92	2,30	60	13	12,67	0,05	0,63	0,68	2,39
5	217	0,29	1,67	40	12	10,80	0,04	0,44	1,51	1,73
6	265	0,30	1,68	40	13	12,67	0,04	0,51	1,70	1,74
7	301	0,60	1,98	55	14	14,70	0,05	0,74	1,23	2,12
8	217	0,70	2,08	75	11	9,07	0,07	0,63	0,90	2,17
9	265	0,80	2,18	105	14	14,70	0,09	1,32	1,65	2,55
10	301	0,99	2,37	135	13	12,67	0,12	1,52	1,53	2,82
11	169	0,05	1,43	25	10	7,50	0,02	0,15	3,00	1,47
12	217	0,14	1,52	35	11	9,07	0,03	0,27	1,93	1,54
13	265	1,11	2,49	60	14	14,70	0,05	0,74	0,67	2,60
14	301	0,98	2,36	65	14	14,70	0,06	0,88	0,90	2,52
15	217	0,19	1,57	35	15	16,87	0,03	0,51	2,69	1,65
16	265	0,48	1,86	57	13	12,67	0,05	0,63	1,31	1,97
17	301	0,59	1,97	77	13	12,67	0,07	0,89	1,51	2,16
18	217	0,45	1,83	65	10	7,50	0,06	0,45	1,00	1,86
19	265	0,86	2,24	100	10	7,50	0,09	0,68	0,79	2,30
20	301	1,55	2,93	115	11	9,07	0,10	0,91	0,59	3,03
21	121	0,08	1,46	35	10	7,50	0,03	0,22	2,75	1,47
22	169	0,11	1,49	35	15	16,87	0,03	0,51	4,64	1,58
23	265	0,10	1,48	35	18	24,30	0,03	0,73	7,30	1,62
24	169	0,25	1,63	25	10	7,50	0,02	0,15	0,60	1,63
25	217	0,50	1,88	45	11	9,07	0,04	0,36	0,72	1,91
26	265	0,60	1,98	55	12	10,80	0,05	0,54	0,90	2,00
27	301	1,00	2,38	60	12	10,80	0,05	0,54	0,54	2,45
28	121	0,25	1,63	40	41	1,20	0,04	0,05	0,20	1,64
29	169	0,30	1,68	55	5	1,87	0,05	0,09	0,30	1,69
30	217	0,86	2,24	80	6	2,70	0,07	0,19	0,22	2,26
31	265	1,32	2,70	105	6	2,70	0,09	0,24	0,18	2,70
32	301	1,06	2,44	95	7	3,67	0,09	0,33	0,31	2,45
33	121	0,26	1,64	30	4	1,20	0,03	0,04	0,16	1,64
34	169	0,08	1,46	23	4	1,20	0,02	0,02	0,25	1,46
35	217	0,11	1,49	25	4	1,20	0,02	0,02	0,18	1,49

Номер п/п	H м	P_0 кг/м	P кг/м	a мм	a м/сек.	q_0 кг/м ²	S м ²	q кг/м	$\frac{q}{P_0}$	R кг/м
36	265	1,19	2,57	90	4	1,20	0,08	0,10	0,09	2,57
37	301	1,54	2,92	100	3	0,67	0,09	0,06	0,04	2,92
38	121	0,09	1,47	25	10	7,50	0,02	0,15	1,67	1,47
39	169	0,15	1,53	35	11	9,07	0,03	0,27	1,80	1,54
40	217	0,25	1,63	40	15	16,87	0,04	0,67	2,68	1,72
41	265	0,45	1,83	52	15	16,87	0,05	0,84	1,87	2,03
42	301	0,45	1,83	57	17	21,67	0,05	1,08	2,40	2,07
43	169	0,18	1,56	35	8	4,80	0,03	0,14	0,78	1,57
44	217	0,20	1,58	40	9	6,07	0,04	0,24	1,20	1,60
45	265	0,28	1,66	55	10	7,50	0,05	0,38	1,29	1,70
46	301	0,30	1,68	55	12	10,80	0,05	0,54	1,80	1,76
47	217	0,19	1,57	30	8	4,80	0,03	0,14	0,74	1,58
48	265	0,58	1,96	65	8	4,80	0,06	0,29	0,50	1,96
49	301	0,55	1,93	60	11	9,07	0,05	0,48	0,88	2,00
50	265	0,22	1,60	45	12	10,80	0,04	0,43	1,96	1,65
51	301	0,58	1,96	70	15	16,87	0,06	1,01	1,74	2,27
52	169	0,08	1,46	30	5	1,87	0,03	0,06	0,75	1,45
53	217	0,18	1,56	35	6	2,70	0,03	0,08	0,44	1,56
54	265	0,67	2,05	65	7	3,67	0,06	0,22	0,33	2,06
55	301	1,79	3,17	115	8	4,80	0,10	0,48	0,27	3,18
56	169	0,07	1,45	30	5	1,87	0,03	0,06	0,86	1,45
57	217	0,19	1,57	40	6	2,70	0,04	0,11	0,57	1,58
58	265	0,71	2,09	85	6	2,70	0,08	0,22	0,31	2,10
59	301	1,92	3,30	125	8	4,80	0,11	0,53	0,26	3,33
60	217	0,13	1,51	40	11	9,07	0,04	0,36	2,77	1,55
61	265	0,23	1,61	55	12	10,80	0,05	0,54	2,35	1,68
62	301	0,31	1,69	70	12	10,80	0,06	0,65	2,10	1,80
63	121	0,06	1,44	25	14	14,70	0,02	0,29	4,83	1,47
64	169	0,12	1,50	30	13	12,67	0,03	0,38	3,17	1,55
65	217	0,25	1,63	45	14	14,70	0,04	0,59	2,36	1,74
66	265	0,24	1,62	40	15	16,87	0,04	0,68	2,45	1,74
67	301	0,24	1,62	60	14	14,70	0,05	0,74	3,08	1,78
68	217	0,02	1,40	20	15	16,87	0,02	0,34	17,00	1,44
69	265	0,02	1,40	25	15	16,87	0,02	0,34	17,00	1,44
70	301	0,02	1,40	25	16	19,20	0,02	0,34	17,00	1,44
71	73	0,13	1,51	35	7	3,67	0,03	0,11	0,85	1,51
72	121	0,025	1,63	45	9	6,07	0,04	0,24	0,96	1,64
73	169	0,30	1,68	65	10	7,50	0,06	0,45	0,50	1,72

Номер п/п	H м	P_0 кг/м	P кг/м	a мм	u м/сек.	q_0 кг/м ²	S м ²	q кг/м	$\frac{q}{P_0}$	R кг/м
74	217	0,40	1,78	70	11	9,07	0,06	0,54	1,35	1,87
75	265	0,43	1,81	70	12	10,80	0,06	0,65	1,52	1,93
76	301	0,45	1,83	75	12	10,80	0,07	0,76	1,70	1,98
77	169	0,12	1,50	30	12	10,80	0,03	0,32	2,67	1,52
78	217	0,21	1,59	45	12	10,80	0,04	0,43	2,05	1,63
79	265	0,45	1,83	75	14	14,70	0,07	1,03	2,30	2,10
80	301	0,70	2,08	95	14	14,70	0,09	1,32	1,89	2,47
81	169	0,11	1,49	25	12	10,80	0,02	0,32	2,00	1,50
82	217	0,28	1,66	45	14	14,70	0,04	0,59	2,10	1,70
83	265	0,44	1,82	75	15	16,87	0,07	1,18	2,68	2,20
84	301	0,57	1,95	90	15	16,87	0,08	1,35	2,37	2,40
85	73	0,11	1,49	25	5	1,87	0,02	0,04	0,36	1,49
86	121	0,39	1,77	60	5	1,87	0,05	0,09	0,23	1,77
87	169	0,63	2,01	75	7	3,67	0,07	0,26	0,41	2,02
88	217	0,97	2,35	95	9	6,07	0,09	0,55	0,56	2,40
89	265	1,29	2,67	95	7	3,67	0,09	0,33	0,26	2,68
90	301	1,28	2,66	95	6	2,70	0,09	0,24	0,18	2,68
91	73	0,32	1,70	45	4	1,20	0,04	0,05	0,16	1,70
92	121	0,50	1,88	65	6	2,70	0,06	0,16	0,32	1,90
93	169	0,75	2,13	95	8	4,80	0,09	0,43	0,57	2,17
94	217	0,80	2,18	115	8	4,80	0,10	0,48	0,60	2,25
95	265	1,60	2,98	135	8	4,80	0,12	0,58	0,36	3,02
96	301	1,45	1,83	95	8	4,80	0,09	0,43	0,30	1,85
97	169	0,11	1,49	90	9	6,07	0,04	0,24	2,18	1,50
98	217	0,54	1,92	90	11	9,07	0,08	0,73	1,36	2,06
99	265	0,72	2,10	125	11	9,07	0,11	1,00	1,40	2,33
100	301	1,44	2,82	165	12	10,80	0,15	1,62	1,13	3,09
101	169	0,11	1,49	50	9	6,07	0,05	0,30	2,73	1,52
102	217	0,50	1,88	90	11	9,07	0,08	0,72	1,45	2,01
103	265	0,66	2,04	125	11	9,07	0,11	1,00	1,52	2,27
104	301	1,14	2,52	165	12	10,80	0,15	1,62	1,44	3,00
105	169	0,37	1,75	25	12	10,80	0,02	0,22	0,58	1,76
106	217	0,54	1,92	45	15	16,87	0,04	0,67	1,24	2,02
107	265	0,67	2,05	50	13	12,67	0,05	0,63	0,94	2,13
108	301	0,83	2,21	55	13	12,67	0,05	0,63	0,76	2,30
109	121	0,11	1,49	30	5	1,87	0,03	0,06	0,55	1,49
110	169	0,23	1,61	70	5	1,87	0,06	0,12	0,52	1,61
111	217	0,70	2,08	105	5	1,87	0,09	0,18	0,26	2,09

Номер п/п	H м	P_0 кг/м	P кг/м	a мм	u м/сек.	q_0 кг/м ²	S м ²	q кг/м	$\frac{q}{P_0}$	R кг/м
112	265	1,70	3,08	165	7	3,67	0,15	0,55	0,32	3,13
113	301	1,90	3,28	225	7	3,67	0,20	0,73	0,38	3,32
114	121	0,26	1,64	40	7	3,67	0,04	0,15	0,58	1,65
115	169	0,96	2,34	60	8	4,80	0,05	0,24	0,24	2,35
116	217	1,67	3,05	85	8	4,80	0,08	0,38	0,23	3,06
117	265	2,33	3,71	105	9	6,07	0,10	0,61	0,26	3,74
118	301	1,92	3,20	155	11	9,07	0,14	1,27	0,62	3,44
119	121	0,14	1,52	50	7	3,67	0,05	0,18	1,29	1,53
120	169	0,34	1,72	65	7	3,67	0,06	0,22	0,65	1,74
121	217	1,31	2,69	110	7	3,67	0,10	0,37	0,28	2,71
122	265	1,13	2,51	75	7	3,67	0,07	0,26	0,23	2,51
123	301	2,54	3,92	125	8	4,80	0,11	0,53	0,21	3,95
124	121	0,14	1,52	45	6	2,70	0,04	0,11	0,78	1,52
125	169	0,65	2,03	125	7	3,67	0,11	0,40	0,62	2,07
126	217	1,45	2,83	155	8	4,80	0,14	0,67	0,47	2,90
127	265	2,44	3,82	245	9	6,07	0,22	1,34	0,50	4,05
128	301	2,97	4,35	245	10	7,50	0,22	1,65	0,42	4,48
129	121	0,16	1,54	45	4	1,20	0,04	0,05	0,31	1,54
130	169	0,64	2,02	70	6	2,70	0,07	0,19	0,30	2,02
131	217	0,77	2,15	95	9	6,07	0,09	0,55	0,72	2,20
132	265	1,00	2,38	95	12	10,80	0,09	0,97	0,97	2,52
133	301	1,25	2,63	105	10	7,50	0,09	0,68	0,54	2,72
134	73	0,32	1,70	45	4	1,20	0,04	0,05	0,17	1,70
135	121	0,50	1,88	65	6	2,70	0,06	0,16	0,32	1,89
136	169	0,75	2,13	95	8	4,80	0,09	0,43	0,57	2,16
137	217	0,80	2,18	115	8	4,80	0,10	0,48	0,60	2,23
138	265	1,60	2,98	135	8	4,80	0,12	0,58	0,36	3,04
139	301	1,45	2,83	95	8	4,80	0,09	0,43	0,30	2,85
140	73	0,11	1,49	25	5	1,87	0,02	0,04	0,36	1,49
141	121	0,39	1,78	60	5	1,87	0,05	0,09	0,23	1,78
142	169	0,63	1,91	75	7	3,67	0,07	0,26	0,41	1,93
143	217	0,97	1,35	95	9	6,07	0,09	0,55	0,56	1,44
144	265	1,29	2,57	95	7	3,67	0,09	0,33	0,25	2,59
145	301	1,28	2,66	95	6	2,70	0,09	0,24	0,19	2,67
146	121	0,29	1,67	50	7	3,67	0,05	0,18	0,62	1,67
147	169	0,52	1,90	70	8	4,80	0,06	0,29	0,56	1,92
148	217	0,77	2,15	145	10	7,50	0,13	0,98	1,28	2,36
149	265	1,56	2,94	135	9	6,07	0,12	0,73	0,47	3,03

Номер п/п	H м	P_0 кг/м	P кг/м	a мм	u м/сек.	q_0 кг/м ²	S м ²	q кг/м	$\frac{q}{P_0}$	R кг/м
150	301	1,78	3,16	105	10	7,50	0,09	0,68	0,38	3,20
151	169	0,81	2,19	75	7	3,67	0,07	0,26	0,32	2,21
152	217	0,82	2,20	65	13	12,67	0,06	0,76	0,93	2,30
153	265	1,33	2,71	135	10	7,50	0,12	0,90	0,67	2,81
154	301	0,83	2,21	120	8	4,80	0,11	0,53	0,64	2,23
155	121	0,88	2,25	75	11	9,07	0,07	0,63	0,72	2,34
156	169	0,97	2,35	85	12	10,80	0,08	0,81	0,82	2,48
157	217	1,39	2,77	85	12	10,80	0,08	0,81	0,58	2,86
158	265	2,10	3,48	105	14	14,70	0,10	1,47	0,70	3,81
159	301	4,42	5,80	185	14	14,70	0,17	2,50	0,55	6,32
160	121	1,50	2,88	30	6	2,70	0,03	0,08	0,05	2,89
161	169	1,84	3,22	155	6	2,70	0,14	0,38	0,23	3,25
162	217	0,85	2,23	115	9	6,07	0,11	0,67	0,78	2,33
163	265	2,14	3,52	110	12	10,80	0,10	1,08	0,47	3,68
164	301	2,91	4,29	135	10	7,50	0,12	0,90	0,35	4,36
165	121	0,39	1,77	65	7	3,67	0,06	0,22	0,57	1,77
166	169	0,64	2,02	125	8	4,80	0,11	0,53	0,83	2,08
167	217	1,21	2,59	125	9	6,07	0,11	0,67	0,55	2,60
168	265	1,98	3,36	215	10	7,50	0,20	1,50	0,76	3,68
169	301	3,40	4,78	185	10	7,50	0,17	1,28	0,37	4,90
170	121	0,12	1,50	40	7	3,67	0,04	0,15	1,15	1,51
171	169	0,22	1,60	55	8	4,80	0,05	0,24	1,20	1,62
172	217	0,63	2,01	85	9	6,07	0,08	0,49	0,78	2,05
173	265	1,23	2,51	135	9	6,07	0,12	0,73	0,58	2,60
174	301	2,20	3,58	110	8	4,80	0,10	0,48	0,22	3,61
175	73	0,18	1,56	30	4	1,20	0,03	0,04	0,22	1,56
176	121	0,27	1,65	35	4	1,20	0,03	0,04	0,15	1,65
177	169	1,43	2,81	110	5	1,87	0,10	0,19	0,15	2,82
178	217	0,53	1,91	55	6	2,70	0,05	0,14	0,30	1,92
179	265	0,46	1,84	60	7	3,67	0,05	0,18	0,38	1,85
180	301	2,96	3,34	190	7	3,67	0,17	0,62	0,21	3,36
181	121	0,56	1,94	75	7	3,67	0,07	0,26	0,47	1,96
182	169	0,30	1,68	35	8	4,80	0,03	0,14	0,47	1,69
183	217	0,25	1,63	35	8	4,80	0,03	0,14	0,56	1,64
184	265	0,39	1,77	60	8	4,80	0,05	0,24	0,62	1,79
185	301	2,90	4,28	185	9	6,07	0,17	1,03	0,35	4,42
186	217	0,13	1,51	45	11	9,07	0,04	0,36	2,80	1,53
187	265	0,24	1,62	75	14	14,70	0,07	1,03	4,30	1,92

номер п/п	H м	P_0 кг/м	P кг/м	a мм	u м/сек.	q_0 кг/м ²	S м ²	q кг/м	$\frac{q}{P_0}$	R кг/м
188	301	0,65	2,03	120	18	24,30	0,11	2,67	4,10	3,36
189	301	10,35	11,73	225	1	0,07	0,20	0,002	0,002	11,73
190	310	11,39	12,77	225	11	9,07	0,23	2,09	0,16	12,90
191	121	0,88	2,26	75	11	9,07	0,10	0,91	1,03	2,40
192	121	1,50	2,88	95	6	2,70	0,13	0,35	0,23	2,90
193	217	0,07	1,45	25	13	12,70	0,03	0,38	5,40	1,49
194	265	0,15	1,53	30	11	9,07	0,04	0,36	2,40	1,58
195	301	0,25	1,63	35	11	9,07	0,04	0,36	1,44	1,68
196	121	0,48	1,86	20	7	3,67	0,04	0,15	0,34	1,86
197	169	0,20	1,56	35	9	6,07	0,04	0,24	1,20	1,58
198	265	0,56	1,94	55	9	6,07	0,07	0,43	0,77	1,99
199	121	0,65	2,03	55	11	9,07	0,08	0,73	1,12	2,15
200	121	0,17	1,55	25	12	10,80	0,03	0,32	2,00	1,59
201	169	0,37	1,75	25	12	10,8	0,04	0,43	1,17	1,80
202	217	0,17	1,55	25	7	3,67	0,03	0,11	0,70	1,55
203	265	0,49	1,96	40	10	7,50	0,06	0,45	0,94	2,02
204	169	0,10	1,48	2	13	12,67	0,02	0,25	2,50	1,50
205	217	0,40	1,78	7	13	12,67	0,03	0,38	0,95	1,82
206	265	0,43	1,81	7	14	14,70	0,03	0,43	1,00	1,85
207	301	0,68	2,16	10	14	14,70	0,04	0,59	0,87	2,21
208	121	0,06	1,44	1	11	9,07	0,02	0,18	3,00	1,45
209	169	0,31	1,69	6	12	10,80	0,03	0,32	1,03	1,71
210	217	0,56	1,94	8	14	14,70	0,03	0,43	0,77	1,98
211	265	0,77	2,15	10	15	16,87	0,04	0,68	0,88	2,20
212	301	0,88	2,26	12	15	16,87	0,04	0,68	0,78	2,30
213	217	0,96	2,34	12	7	3,67	0,04	0,15	0,15	2,35
214	265	1,44	2,82	16	8	4,80	0,05	0,24	0,17	2,83
215	301	2,18	3,56	21	8	4,80	0,06	0,29	0,13	3,57
216	217	1,08	2,46	13	5	1,87	0,04	0,07	0,07	2,46
217	265	1,67	3,05	18	6	2,70	0,05	0,14	0,08	3,05
218	301	1,93	3,31	19	6	2,70	0,05	0,14	0,07	3,31
219	217	0,53	1,91	8	0	0	0,03	0	0	1,91
220	265	0,79	2,17	11	0	0	0,04	0	0	2,17
221	301	2,48	3,86	23	0	0	0,06	0	0	3,86

Результатирующие нагрузки, рассчитанные по нормативной и измеренным скоростям ветра на различных высотах в слое 121—301 м

H м	P кг	u м/сек.	R кг/м	R_H кг/м	$\frac{R_H-R}{R}$ %	H м	P кг/м	u м/сек.	R кг/м	R_H кг/м	$\frac{R_H-R}{R}$
169	1,68	12	1,70	1,73	2	301	2,38	12	2,45	2,71	10
217	1,81	13	1,88	2,05	9	121	1,63	4	1,64	1,84	12
265	2,16	13	2,25	2,50	11	169	1,68	5	1,69	2,00	18
301	2,30	13	2,39	2,62	10	217	2,24	6	2,26	2,82	25
217	1,67	12	1,73	1,94	12	265	2,70	6	2,70	3,50	30
265	1,68	13	1,74	1,96	13	301	2,44	7	2,45	3,36	37
301	1,98	14	2,12	2,38	12	121	1,64	4	1,64	1,78	9
217	2,08	11	2,17	2,64	22	169	1,46	4	1,46	1,51	3
265	2,18	14	2,55	3,13	23	217	1,49	4	1,49	1,54	3
301	2,37	13	2,82	3,86	35	265	2,57	4	2,57	3,32	29
169	1,43	10	1,47	1,50	2	301	2,92	3	2,92	3,74	32
217	1,52	11	1,54	1,67	8	121	1,47	10	1,47	1,53	3
265	2,49	14	2,60	2,79	7	169	1,53	11	1,54	1,69	9
301	2,36	14	2,52	2,84	13	217	1,63	15	1,72	1,89	10
217	1,57	15	1,65	2,72	4	265	1,83	15	2,03	2,23	12
265	1,86	13	1,97	2,25	14	301	1,83	17	2,07	2,24	8
301	1,97	13	2,16	2,79	29	169	1,56	8	1,57	1,68	7
217	1,83	10	1,86	2,33	25	217	1,58	9	1,60	1,85	15
265	2,24	10	2,30	3,19	39	265	1,66	10	1,70	2,09	23
301	2,93	11	3,03	3,88	28	301	1,68	12	1,76	2,12	26
121	1,46	10	1,47	1,58	7	217	1,57	8	1,58	1,72	8
169	1,49	15	1,58	1,63	3	265	1,96	8	1,96	2,74	39
265	1,48	18	1,65	1,65	0	301	1,93	11	2,00	2,35	17
265	1,63	10	1,63	1,69	3	265	1,60	12	1,65	1,90	15
301	1,88	11	1,91	2,10	10	301	1,96	15	2,27	2,47	8
265	1,98	12	2,00	2,37	18	169	1,46	5	1,46	1,63	11
121	1,64	7	1,65	1,84	12	301	2,66	6	2,67	3,41	28
169	2,34	8	2,35	2,59	10	121	1,67	7	1,67	1,95	16
217	3,05	8	3,06	3,59	17	169	1,90	8	1,92	2,32	20
265	3,71	9	3,74	4,51	21	217	2,15	10	2,36	3,80	61
301	3,20	11	3,44	4,79	39	265	2,94	9	3,03	4,25	40
121	1,52	7	1,53	1,82	19	301	3,16	10	3,20	3,94	26
169	1,72	7	1,74	2,17	25	169	2,19	7	2,21	2,69	21
217	2,69	7	2,71	3,36	24	217	2,20	13	2,30	2,63	14
265	2,51	7	2,51	3,10	23	265	2,71	10	2,81	4,04	44

H м	P кг	u м/сек.	R кг/м	R_H кг/м	$\frac{R_H-R}{R}$ %	H м	P кг/м	u м/сек.	R кг/м	R_H кг/м	$\frac{R_H-R}{R}$ %
301	3,92	8	3,95	4,85	23	301	2,21	8	2,23	3,61	61
121	1,52	6	1,52	1,73	12	121	2,25	11	2,34	2,68	14
169	2,03	7	2,07	3,14	52	169	2,35	12	2,48	2,85	14
217	2,83	8	2,90	4,38	17	217	2,77	12	2,86	3,31	15
265	3,82	9	4,05	6,80	68	265	3,48	14	3,81	4,29	12
301	4,35	10	4,48	7,23	61	301	5,80	14	6,32	7,34	16
121	1,54	4	1,54	1,76	14	121	2,88	6	2,89	2,95	6
169	2,02	6	2,02	2,53	26	169	3,22	6	3,25	4,43	36
217	2,15	9	2,20	3,08	44	217	2,23	9	2,33	3,49	49
265	2,38	12	2,52	3,33	32	265	3,52	12	3,68	4,38	19
301	2,63	10	2,72	3,55	30	301	4,29	10	4,36	5,32	24
121	1,88	6	1,89	2,24	19	121	1,77	7	1,77	2,15	21
169	2,13	8	2,16	2,90	40	169	2,02	8	2,08	3,17	52
217	2,18	8	2,23	3,24	40	217	2,59	9	2,60	3,73	43
265	2,98	8	3,04	4,25	40	265	3,36	10	3,68	6,03	63
301	2,83	8	2,85	3,66	28	301	4,78	10	4,90	6,70	36
121	1,78	5	1,78	2,04	15	121	1,50	7	1,51	1,72	13
169	1,91	7	1,93	2,47	25	169	1,60	8	1,62	1,94	19
217	1,35	9	1,44	2,58	44	217	2,01	9	2,05	2,80	36
265	2,57	7	2,59	3,45	33	265	2,51	9	2,60	3,96	52
217	1,56	6	1,56	1,72	10	217	1,66	14	1,70	1,92	12
265	2,05	7	2,06	2,56	24	265	1,82	15	2,20	2,54	15
301	3,17	8	3,18	4,09	29	301	1,95	15	2,40	2,80	33
169	1,45	5	1,45	1,62	12	301	1,77	15	1,77	1,78	1
217	1,57	6	1,58	1,86	18	169	2,01	5	2,02	3,06	52
265	2,09	6	2,10	2,93	40	217	2,35	7	2,40	3,30	37
301	3,30	8	3,33	4,37	36	265	2,67	9	2,68	3,23	20
217	1,51	11	1,55	1,73	12	301	2,66	7	2,68	2,70	1
265	1,61	12	1,68	2,07	23	121	1,88	6	1,90	2,06	8
301	1,69	12	1,80	2,25	25	169	2,13	4	2,17	3,15	45
121	1,44	14	1,47	1,49	1	217	2,18	6	2,25	3,10	37
169	1,50	13	1,55	1,64	6	265	2,98	8	3,02	4,16	41
217	1,63	14	1,74	1,90	9	301	1,83	8	1,85	2,58	40
265	1,62	15	1,74	1,91	9	169	1,49	8	1,50	1,60	7
301	1,62	14	1,78	2,10	18	217	2,10	8	2,33	2,73	17
217	1,40	15	1,44	1,48	3	265	2,82	9	3,09	3,61	17
265	1,40	15	1,44	1,49	3	169	1,49	11	1,52	3,08	103
301	1,40	16	1,44	1,48	3	169	1,88	11	2,01	2,02	0,5

H М	P кг	u м/сек.	R кг/м	R_H кг/м	$\frac{R_H-R}{R}\%$	H М	P кг/м	u м/сек.	R кг/м	R_H кг/м	$\frac{R_H-R}{R}\%$
121	1,51	7	1,51	1,63	8	217	2,04	12	2,27	2,60	45
121	1,63	9	1,64	2,16	32	265	2,52	12	3,00	4,63	60
169	1,68	10	1,72	2,24	30	301	1,75	12	1,76	1,83	3
217	1,78	11	1,87	2,26	21	217	1,92	15	2,02	2,14	5
265	1,81	12	1,93	2,39	24	265	2,05	13	2,13	2,41	13
301	1,83	12	1,98	2,58	30	301	2,21	13	2,30	2,54	10
169	1,50	12	1,52	1,63	7	121	1,49	5	1,49	1,63	9
217	1,59	12	1,63	1,86	14	169	1,61	5	1,61	2,16	34
265	1,83	14	2,10	2,53	20	217	2,08	5	2,09	3,13	50
301	2,08	14	2,47	3,14	27	265	3,08	7	3,13	4,93	60
169	1,49	12	1,50	2,04	36	301	3,28	7	3,32	6,07	88
301	3,58	8	3,61	4,42	22	217	1,81	14	1,85	1,86	0,5
121	1,65	4	1,65	1,78	8	265	2,16	14	2,21	2,26	2
169	2,81	5	2,82	3,09	10	301	1,44	14	1,45	1,63	12
217	1,91	6	1,92	2,29	19	121	1,69	11	1,71	2,17	26
265	1,84	7	1,85	2,23	21	169	1,94	12	1,98	1,99	0,5
301	3,34	7	3,36	5,48	63	217	2,15	14	2,20	2,21	0,2
121	1,94	7	1,96	2,43	24	265	2,26	15	2,30	2,35	2
169	1,68	8	1,69	1,80	6	301	2,34	15	2,35	2,55	8
217	1,63	8	1,64	1,90	16	217	2,82	7	2,83	3,30	16
265	1,77	8	1,79	1,92	7	265	3,56	8	3,57	3,64	2
301	4,28	9	4,42	4,46	1	301	2,46	8	2,46	2,78	13
217	1,51	11	1,53	1,60	5	217	3,05	5	3,05	4,85	62
265	1,62	14	1,92	2,50	30	265	3,31	6	3,31	3,37	2
301	2,03	18	3,36	3,36	0	301	1,91	6	1,91	2,35	23
301	11,73	1	11,73	13,70	17	217	2,17	0	2,17		
310	12,77	11	12,90	14,65	14	265	3,86	0	3,86		
121	2,26	6	2,40	3,72	53	301	3,80	0	3,82		
121	2,88	13	2,90	3,23	11						
217	1,45	11	1,49	1,71	15						
265	1,53	11	1,58	1,82	15						
301	1,63	7	1,68	3,00	79						
121	1,86	9	1,86	2,21	19						
169	1,56	9	1,58	1,65	4						
265	1,94	11	1,99	2,03	2						
121	2,03	12	2,15	2,19	2						
121	1,55	12	1,59	2,08	31						
169	1,75	7	1,80	2,60	44						
217	1,55	10	1,55	2,07	34						
265	1,96	13	2,02	2,87	42						
169	1,48	13	1,50	1,67	11						

Динамические составляющие ветровых (q') и результирующих (R') нагрузок по высотам в слое 121-301 м

Номер п/п	H м	γ град/100 м	P кг/м	S м ²	$\bar{u}$ м/сек.	K	$u_{\max}$ м/сек.	$\bar{q}$ кг/м	$q_{\max}$ кг/м	q' кг/м	$\frac{q'}{q}$	$\bar{R}$ кг/м	$R_{\max}$ кг/м	$\frac{R'}{R}$ кг/м	$\frac{R'}{R}$
1	169	+1,43	0,68	0,02	12	1,36	16,32	0,22	0,41	0,19	0,86	1,70	1,73	0,03	2
2	217	+1,43	1,81	0,04	13	1,39	18,07	0,51	0,98	0,47	0,92	1,88	2,06	0,18	11
3	265	+1,43	2,16	0,05	13	1,39	18,07	0,63	1,22	0,59	0,94	2,25	2,48	0,23	10
4	301	+1,43	2,30	0,05	13	1,39	18,07	1,73	3,32	1,59	0,94	2,39	2,60	0,29	12
5	217	+0,90	1,67	0,04	12	1,36	16,32	0,44	0,81	0,37	0,84	1,73	1,87	0,14	8
6	265	+0,90	1,68	0,04	13	1,39	18,07	0,51	0,98	0,47	0,92	1,74	1,95	0,21	12
7	301	+0,90	1,98	0,05	14	1,39	19,46	0,74	1,43	0,69	0,93	2,12	2,44	0,32	15
8	217	+1,45	2,08	0,05	14	1,39	19,46	0,63	1,22	0,59	0,94	2,17	2,41	0,24	11
9	265	+1,45	2,18	0,07	11	1,36	14,96	1,32	2,44	1,12	0,85	2,55	3,27	0,72	8
10	301	+1,45	2,37	0,09	14	1,39	19,46	1,52	2,93	1,41	0,93	2,82	3,77	0,95	31
11	169	0,00	1,43	0,12	13	1,24	16,12	0,15	0,23	0,08	0,53	1,43	1,45	0,02	1
12	217	0,00	1,52	0,02	10	1,27	12,70	0,27	0,44	0,17	0,63	1,54	1,58	0,04	3
13	265	0,00	2,49	0,03	11	1,20	13,20	0,74	1,07	0,32	0,43	2,60	2,71	0,11	4
14	301	0,00	2,36	0,05	14	1,24	17,36	0,88	1,36	0,48	0,54	2,52	2,72	0,20	8
15	217	+0,77	1,57	0,03	15	1,43	21,45	0,51	1,04	0,53	1,04	1,65	1,88	0,23	14
16	265	+0,77	1,86	0,05	13	1,39	18,07	0,63	1,22	0,59	0,94	1,97	2,22	0,25	13
17	301	+0,77	1,97	0,07	13	1,39	18,07	0,89	1,72	0,83	0,93	2,16	2,62	0,46	21
18	301	+0,73	2,93	0,10	11	1,36	14,96	0,91	1,68	0,77	0,85	3,03	3,38	0,35	11
19	169	+0,30	1,49	0,03	15	1,22	18,30	0,51	0,76	0,25	0,49	1,58	1,67	0,09	6
20	265	+0,30	1,48	0,03	18	1,22	21,96	0,73	1,09	0,36	0,49	1,62	1,84	0,22	14
21	217	+1,10	1,88	0,04	11	1,36	14,96	0,36	0,67	0,31	0,86	1,91	1,99	0,08	4

Номер п/п	H м	γ град/100 м	P кг/м	S м ²	$\bar{u}$ м/сек.	K	$u_{\max}$ м/сек.	$\bar{q}$ кг/м	$q_{\max}$ кг/м	q' кг/м	$\frac{q'}{q}$	$\bar{R}$ кг/м	$R_{\max}$ кг/м	R' кг/м	$\frac{R'}{\bar{R}}$
22	265	+1,10	1,98	0,05	12	1,36	16,32	0,54	1,00	0,46	0,85	2,00	2,22	0,22	11
23	301	+1,10	2,38	0,05	12	1,36	16,32	0,54	1,00	0,46	0,85	2,45	2,58	0,13	5
24	121	+0,97	1,47	0,02	10	1,46	14,60	0,15	0,32	0,17	1,33	1,47	1,50	0,03	2
25	169	+0,97	1,53	0,03	11	1,36	14,96	0,27	0,50	0,23	0,85	1,54	1,61	0,07	4
26	217	+0,97	1,63	0,04	15	1,43	21,45	0,67	1,37	0,70	1,04	1,72	2,13	0,41	24
27	265	+0,97	1,83	0,05	15	1,43	21,45	0,84	1,71	0,87	1,04	2,03	2,50	0,47	23
28	301	+0,97	1,83	0,05	17	1,36	23,12	1,08	2,00	0,92	0,85	2,08	2,71	0,63	30
29	169	+0,17	1,56	0,03	8	1,27	10,16	0,14	0,23	0,09	0,64	1,56	1,57	0,01	1
30	217	+0,17	1,58	0,04	9	1,27	11,43	0,24	0,34	0,15	0,63	1,60	1,62	0,02	1
31	265	+1,10	1,65	0,05	10	1,36	13,60	0,38	0,70	0,32	0,84	1,70	1,80	0,10	6
32	301	+1,10	1,68	0,05	12	1,36	16,32	0,54	1,00	0,46	0,85	1,76	1,96	0,20	11
33	301	+0,50	1,93	0,05	11	1,20	13,20	0,48	0,69	0,21	0,44	2,00	2,05	0,05	2
34	265	+1,37	1,60	0,04	12	1,36	16,32	0,43	0,80	0,37	0,86	1,65	1,79	0,14	8
35	301	+1,37	1,96	0,05	15	1,43	21,45	1,01	2,06	1,05	1,04	2,27	2,84	0,57	25
36	217	+1,10	1,51	0,04	11	1,36	14,96	0,36	0,67	0,31	0,86	1,55	1,65	0,10	6
37	265	+1,10	1,61	0,05	12	1,36	16,32	0,54	1,00	0,46	0,85	1,70	1,90	0,10	6
38	301	+1,10	1,69	0,06	12	1,36	16,32	0,65	1,20	0,55	0,85	1,80	2,07	0,27	15
39	121	+0,70	1,44	0,02	14	1,47	20,58	0,29	0,63	0,34	1,17	1,47	1,57	0,10	7
40	169	+0,70	1,50	0,03	13	1,39	18,07	0,38	0,73	0,35	0,92	1,55	1,67	0,12	8
41	217	+0,70	1,63	0,04	14	1,39	19,46	0,59	1,14	0,55	0,93	1,74	1,99	0,25	14
42	265	+0,70	1,62	0,04	15	1,43	21,45	0,68	1,39	0,71	1,04	1,74	2,13	0,39	22
43	301	+0,70	1,62	0,05	14	1,39	19,46	0,74	1,43	0,69	0,93	1,78	2,16	0,38	21

46	301	+0,32	1,40	0,02	1,22	10,50	0,04	0,01	0,17	0,50	1,44	1,49	0,06	3
47	169	+0,66	1,68	0,06	1,36	13,60	0,45	0,83	0,38	0,84	1,72	1,87	0,15	9
48	217	+0,66	1,78	0,06	1,36	14,96	0,54	1,00	0,46	0,85	1,87	2,04	0,17	10
49	265	+0,66	1,81	0,06	1,36	16,32	0,65	1,20	0,55	0,85	1,93	2,17	0,24	12
50	301	+0,66	1,83	0,07	1,36	16,32	0,76	1,41	0,65	0,86	1,98	2,31	0,33	17
51	169	+0,77	1,50	0,03	1,36	16,32	0,32	0,59	0,27	0,84	1,52	1,61	0,09	6
52	217	+0,77	1,59	0,04	1,36	16,32	0,43	0,80	0,37	0,86	1,63	1,78	0,15	9
53	265	+0,77	1,83	0,07	1,39	19,46	1,03	1,99	0,96	0,93	2,10	2,32	0,22	10
54	301	+0,77	2,08	0,09	1,39	19,46	1,32	2,55	1,23	0,93	2,47	2,78	0,31	12
55	169	+1,37	1,49	0,02	1,36	16,32	0,22	0,41	0,19	0,86	1,60	1,84	0,24	15
56	217	+1,37	1,66	0,04	1,39	19,46	0,59	1,14	0,55	0,93	1,77	2,27	0,50	28
57	265	+1,37	1,82	0,07	1,43	21,45	1,18	2,41	1,23	1,04	2,20	3,92	1,72	8
58	301	+1,37	1,95	0,08	1,43	21,45	1,35	2,75	1,40	1,04	2,40	4,42	2,02	8
59	217	+1,20	1,92	0,08	1,36	14,96	0,73	1,35	0,52	0,71	2,66	3,17	1,11	5
60	265	+1,20	2,10	0,11	1,36	14,96	1,00	1,85	0,85	0,85	2,33	3,33	1,00	4
61	301	+1,20	2,82	0,15	1,36	16,32	1,62	3,00	1,38	0,85	3,09	3,51	0,42	14
62	217	+0,40	1,88	0,08	1,20	13,20	0,72	1,04	0,32	0,44	2,01	2,15	0,44	7
63	265	+0,40	2,04	0,11	1,20	13,20	1,00	1,04	0,44	0,44	2,27	2,29	0,02	1
64	301	+0,40	2,52	0,15	1,20	14,40	1,62	2,33	0,71	0,44	3,10	3,43	0,43	14
65	169	+1,47	1,75	0,02	1,36	16,32	0,22	0,41	0,19	0,86	1,76	1,80	0,04	2
66	217	+1,47	1,92	0,04	1,43	21,45	0,67	1,37	0,70	1,04	2,02	2,36	0,34	17
67	265	+1,47	2,05	0,05	1,39	18,07	0,63	1,22	0,59	0,94	2,13	2,39	0,26	12
68	301	+1,47	2,21	0,05	1,39	18,07	0,63	1,22	0,59	0,94	2,30	2,52	0,22	9
69	301	+0,53	3,20	0,14	1,20	13,20	1,27	1,83	1,05	0,83	3,44	3,69	0,25	7
70	301	+1,00	4,35	0,22	1,36	13,60	1,65	3,05	1,40	0,85	4,48	5,31	0,83	18

Номер п/п	H м	γ град/100 м	P кг/м	S м ²	$\bar{u}$ м/сек.	K	$u_{\max}$ м/сек.	$\bar{q}$ кг/м	$q_{\max}$ кг/м	q' кг/м	$\frac{q'}{q}$	$\bar{R}$ кг/м	$R_{\max}$ кг/м	R' кг/м	$\frac{R'}{\bar{R}}$
71	265	+0,53	2,38	0,09	12	1,20	14,40	0,97	1,40	0,43	0,44	2,52	2,76	0,24	9
72	301	+0,53	2,63	0,09	10	1,27	12,70	0,68	1,10	0,42	0,62	2,72	2,85	0,13	5
73	217	+1,93	2,20	0,06	13	1,39	18,07	0,76	1,47	0,71	0,93	2,30	2,65	0,35	15
74	121	+0,50	2,25	0,07	11	1,48	16,28	0,63	1,38	0,75	1,19	2,34	2,64	0,30	13
75	169	+0,50	2,35	0,08	12	1,20	14,40	0,81	1,17	0,36	0,44	2,48	2,62	0,14	6
76	217	+0,50	2,77	0,08	12	1,20	14,40	0,81	1,17	0,36	0,44	2,86	3,01	0,15	5
77	265	+0,50	3,48	0,10	14	1,24	17,36	1,47	2,26	0,79	0,54	3,81	4,16	0,34	9
78	301	+0,50	5,80	0,17	14	1,24	17,36	2,50	3,85	1,35	0,54	6,32	6,96	0,64	10
79	265	+1,00	3,52	0,10	12	1,36	16,32	1,08	2,00	0,92	0,85	3,68	4,05	0,37	10
80	265	-0,42	3,36	0,20	10	1,16	11,60	1,50	2,02	0,52	0,35	3,68	3,92	0,24	6
81	301	-0,42	4,78	0,17	10	1,16	11,60	1,28	1,73	0,45	0,35	4,90	5,08	0,18	4
82	217	+0,24	1,51	0,04	11	1,20	13,20	0,36	0,52	0,16	0,44	1,53	1,60	0,07	5
83	265	+0,24	1,62	0,07	14	1,24	17,36	1,03	1,59	0,56	0,54	1,92	2,27	0,35	18
84	301	+0,24	2,03	0,11	18	1,22	21,96	2,67	3,98	1,18	0,44	3,36	4,47	1,11	3
85	310	+0,38	12,77	0,23	11	1,20	13,20	2,09	3,01	0,92	0,44	12,90	13,09	0,19	15
86	121	+0,70	2,26	0,10	11	1,48	16,28	0,93	2,04	1,11	1,19	2,40	3,64	0,64	27
87	217	+1,03	1,45	0,03	13	1,39	18,07	0,38	0,73	0,35	0,92	1,49	1,62	0,13	9
88	265	+1,03	1,53	0,04	11	1,36	15,00	0,36	0,67	0,31	0,86	1,58	1,67	0,09	5
89	301	+1,03	1,63	0,04	11	1,36	15,00	0,36	0,67	0,31	0,86	1,68	1,76	0,08	5
90	121	-0,73	2,03	0,08	11	1,36	15,00	0,73	1,35	0,62	0,84	2,15	2,44	0,29	13
91	121	+1,40	1,55	0,03	12	1,48	17,76	0,32	0,70	0,38	1,18	1,59	1,70	0,11	7
92	169	+1,40	1,75	0,04	12	1,36	16,32	0,43	0,80	0,37	0,86	1,80	1,92	0,12	6

94	169	+0,10	1,48	0,02	13	1,24	16,12	0,25	0,38	0,13	0,52	1,50	1,53	0,03	2
95	217	+0,10	1,78	0,03	13	1,24	16,12	0,38	0,58	0,20	0,52	1,82	1,88	0,06	3
96	265	+2,10	1,81	0,03	14	1,24	17,36	0,43	0,66	0,23	0,54	1,85	1,93	0,08	4
97	301	+0,10	2,16	0,04	14	1,24	17,36	0,59	0,91	0,32	0,55	2,21	2,34	0,13	6
98	121	+1,23	1,44	0,02	11	1,48	16,28	0,18	0,39	0,21	1,16	1,45	1,50	0,05	3
99	169	+1,23	1,69	0,03	12	1,36	16,32	0,32	0,62	0,30	0,94	1,71	1,80	0,09	5
100	217	+1,23	1,94	0,03	14	1,39	19,50	0,43	0,83	0,40	0,93	1,98	2,10	0,12	6
101	265	+1,23	2,15	0,04	15	1,43	21,50	0,68	1,39	0,71	1,04	2,20	2,56	0,36	17
102	301	+1,23	2,26	0,04	13	1,43	21,50	0,68	1,39	0,71	1,04	2,30	2,65	0,85	15
103	169	+1,00	1,58	0,03	11	1,36	15,00	0,27	0,50	0,23	0,85	1,60	1,66	0,06	4
104	217	+1,00	1,66	0,03	12	1,36	16,32	0,32	0,59	0,28	0,80	1,68	1,76	0,08	5
105	265	+1,00	1,80	0,05	12	1,36	16,32	0,54	1,00	0,46	0,85	1,88	2,06	1,18	9
106	301	+1,00	3,70	0,14	12	1,36	10,32	1,51	2,79	1,28	0,80	3,97	4,32	0,35	9
107	217	+0,80	1,44	0,02	12	1,36	16,32	0,22	0,41	0,19	0,86	1,46	1,50	0,04	3
108	265	+0,80	1,45	0,04	12	1,36	16,32	0,44	0,81	0,37	0,84	1,50	1,67	0,17	11
109	301	+0,80	1,53	0,04	12	1,36	16,32	0,44	0,81	0,37	0,84	1,59	1,73	0,14	9
110	217	+0,59	1,43	0,02	15	1,22	18,30	0,34	0,51	0,17	0,50	1,47	1,52	0,05	3
111	265	+0,59	1,48	0,04	14	1,24	17,36	0,59	0,90	0,31	0,52	1,59	1,73	0,14	9
112	301	+0,59	1,55	0,05	14	1,24	17,36	0,59	0,90	0,31	0,52	1,66	1,79	0,13	8

ЛИТЕРАТУРА

1. Александрова А. Г. О вертикальной стратификации атмосферы при гололеде.— Труды ГГО, 1957, вып. 75.
2. Анапольская Л. Е., Гандин Л. С. Теоретические основы строительной климатологии.— В кн.: «Современные проблемы климатологии». Л., Гидрометеониздат, 1966.
3. Анапольская Л. Е. Режим скоростей ветра на территории СССР. Л., Гидрометеониздат, 1961.
4. Андреев Ю. Н. К вопросу о физико-метеорологических условиях образования гололеда.— Труды ГГО, 1947, вып. 3(65).
5. Андреев И. Д. Порывистость ветра внутри часового интервала.— В кн.: «Вопросы ветроэнергетики» М., Изд. АН СССР, 1959.
6. Андреев И. Д. Порывистость ветра — Труды Всесоюзного метеорологического совещания, т. VIII, 1963.
7. Базилевич В. В. Влияние микроструктуры тумана на обледенение проводов.— Труды ГГО, 1947, вып. 3(65).
8. Балабуев А. Г. Гололедно-изморозевые явления в Закавказье.— Труды ГГО, 1947, вып. 3(65).
9. Барштейн М. Ф. Воздействие ветра на высокие сооружения.— Строительная механика и расчет сооружений, 1959, № 1.
10. Беленький Б. М. Гололедно-изморозевые образования на плоской вершине горы Юкспор.— Труды ГГО, 1958, вып. 85.
11. Белоус И. М. Влияние физико-географических и метеорологических условий на плотность гололедно-изморозевых отложений.— Труды ГГО, 1970, вып. 265.
12. Белоус И. М., Заварина М. В. О вероятности обледенения высотных сооружений.— В кн.: «Современное состояние и перспективы развития инструментальных наблюдений за гололедно-изморозевыми явлениями». Л., Гидрометеониздат, 1970.
13. Борисенко М. М., Глухов В. Г. О порывистости ветра в нижних слоях атмосферы.— Труды ГГО, 1964, вып. 210.
14. Борисенко М. М., Глухов В. Г. О порывистости ветра при гололедно-изморозевых явлениях в нижнем 300-метровом слое атмосферы.— Труды ГГО, 1970, вып. 265.
15. Боровиков А. М., Мазин И. П. Некоторые новые данные о микроструктуре облаков над ЕТС.— Труды ЦАО, 1965, вып. 18.
16. Бургсдорф В. В. О физике гололедно-изморозевых явлений.— Труды ГГО, 1947, вып. 3(65).
17. Бургсдорф В. В., Муретов Н. С. Расчетные климатические условия для линий электропередачи и связи, т. 1. Гололедные нагрузки линий электропередачи в СССР.— Труды ВНИИЭ, 1960, вып. X.
18. Бучинский В. Е. Организация информации об обледенении проводов. «Железнодорожный транспорт», 1952, № 11.
19. Бучинский В. Е. Гололед и борьба с ним. Л., Гидрометеониздат, 1962.
20. Бучинский В. Е. Атлас обледенения проводов. Л., Гидрометеониздат, 1955.

21. Вегенер А. Гидродинамика атмосферы. М., ОНТИ, 1935.
22. Вейнберг Б. П. Лед. М., Гостехиздат, 1940.
23. Вейнберг Б. П. Сборник работ по исследованию условий обледенения. 1937.
24. Вейнберг Б. П. О степени соответствия опытным данным взглядов проф. Б. Я. Альберга на процессы кристаллизации переохлажденной воды.— «Метеорология и гидрология», 1939, № 9.
25. Волковицкая Э. Н., Машкова Г. Б. О профилях ветра и характеристиках турбулентного режима в нижнем 300-метровом слое атмосферы.— В кн.: «Исследования пограничного слоя атмосферы с 300-метровой метеорологической башни». М., Изд. АН СССР, 1963.
26. Волковицкая Э. Н., Иванов В. Н. Учет турбулентных характеристик ветра при расчете динамических нагрузок на высокие сооружения.— Труды ИЭМ, 1967, вып. 10.
27. Воронцов П. А. Аэрологические условия обледенения самолетов.— Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 1940, № 3.
28. Воронцов П. А. Аэрологические исследования пограничного слоя атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1960.
29. Вексельман О. Г. О влиянии сечения проводов на интенсивность гололедообразования.— «Электричество», 1954, № 2.
30. Гандин Л. С. Проблема ветровых нагрузок на строительные сооружения как проблема прикладной климатологии.— Труды ГГО, 1950, вып. 23(85).
31. Гапонов Б. С. Температурные границы оседания гололеда и изморози из переохлажденных капель тумана.— Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1939, № 2.
32. Глухов В. Г. К вопросу распределения гололедно-изморозевых отложений в нижнем 300-метровом слое атмосферы.— Труды ГГО, 1969, вып. 246.
33. Глухов В. Г. О профилях ветра при гололедно-изморозевых явлениях.— «Метеорология и гидрология», 1969, № 3.
34. Глухов В. Г. К определению количества влаги, оседающей на элементах высотных сооружений в процессе гололедообразования.— Труды ГГО, 1970, вып. 265.
35. Глухов В. Г. К опытным расчетам гололедно-ветровых нагрузок на обледенелые провода.— Труды ГГО, 1971, вып. 283.
36. Глухов В. Г. К оценке гололедных нагрузок на высотные сооружения по данным аэрологических наблюдений.— Труды ГГО, 1971, вып. 283.
37. Гоптарев Н. П. О некоторых характеристиках порывистости ветра.— «Метеорология и гидрология», 1956, № 5.
38. Гухман А. А., Илюхин И. В. Основы учения о теплообмене при течении газа с большой скоростью. М., Машгиз, 1951.
39. Гухман А. А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена (процессы переноса в движущейся среде). М., Изд. «Высшая школа», 1967.
40. Дмитриев А. А. Отложение изморози на проводах в связи с воздействием подстилающей поверхности.— Труды ГГО, 1947, вып. 3(65).
41. Дмитриев А. А. Оценка точности гололедных наблюдений.— Труды ГГО, 1947, вып. 3(65).
42. Дмитриев А. А. К вопросу о форме поперечного сечения отложений из капельножидкого переохлажденного тумана.— Труды ГГО, 1947, вып. 3(65).
43. Дмитриев А. А. Опыт изучения поля ветра около цилиндрической вышки с балконами.— В кн.: «Изучение пограничного слоя с 300-метровой метеорологической башни». М., Изд. АН СССР, 1963.
44. Дмитриев А. А. Основные вопросы, возникающие при организации наблюдений на метеорологической вышке.— В кн.: «Изучение пограничного слоя с 300-метровой метеорологической башни». М., Изд. АН СССР, 1963.
45. Долин П. А. Влияние высоты подвески проводов на величину гололедных отложений.— «Электрические станции». 1958, № 4.
46. Дроздов О. А., Руднева А. В. К вопросу об изменении интенсивности отложения гололеда на проводах с высотой.— Труды ГГО, 1956, вып. 57(119).
47. Заварина М. В. Фазовое строение облаков и обледенение самолетов.— Труды ГГО, 1958, вып. 82.

48. Заварина М. В. Состояние и основные задачи строительной климатологии. Информ. письмо ГУТМС, № 12, М., 1964.
49. Заварина М. В., Швер Ц. А. Результаты климатических разработок применительно к гололедному районированию территории СССР.— Труды ГГО, 1966, вып. 200.
50. Заварина М. В., Борисенко М. М. К вопросу о расчете гололедно-ветровых нагрузок на высотные сооружения.— Труды ГГО, 1967, вып. 210.
51. Заварина М. В., Михель В. М. Климатическая характеристика облаков в зоне недостаточного увлажнения Европейской территории СССР.— Труды ГГО, 1968, вып. 219.
52. Заварина М. В. Удельный вес гололедно-изморозевых отложений.— Труды ГГО, 1970, вып. 265.
53. Заварина М. В., Глухов В. Г. К определению максимальных гололедных нагрузок на высотные сооружения.— «Метеорология и гидрология» 1970, № 7.
54. Заварина М. В., Сорокина Н. С. К определению ветровых нагрузок на обледеневшие провода.— Труды ГГО, 1971, вып. 283.
55. Завьялова Ю. П. К изучению максимальных скоростей ветра.— Труды КазНИГМИ, 1965, вып. 2.
56. Заморский А. Д. Метеорологические условия обледенения.— Труды НИУ ГУТМС, 1946, сер. 1, вып. 24.
57. Заморский А. Д. Иней, изморозь и гололед. Л., Гидрометеиздат, 1951.
58. Заморский А. Д. Морось и гололед при значительных морозах.— «Метеорология и гидрология», 1953, № 4.
59. Заморский А. Д. Атмосферный лед. Иней, гололед, снег и град. М.—Л. Изд. АН СССР, 1955.
60. Иванов В. Н. Турбулентная энергия и ее диссипация.— Изв. АН СССР сер. геофиз., 1946, № 6.
61. Иванов В. Н., Волковицкая З. И. Некоторые характеристики структуры пограничного слоя атмосферы.— В кн.: «Пограничный слой атмосферы» Л., 1965.
62. Кантер Ц. А. Гололед в Саратовской области.— «Метеорология и гидрология», 1957, № 2.
63. Качурин Л. Г. Образование гололеда и изморози в переохлажденном тумане.— Труды ГГО, 1956, вып. 57(119.)
64. Качурин Л. Г. К теории обледенения самолетов.— Изв. АН СССР, сер. геофиз. 1962, № 6.
65. Качурин Л. Г., Морачевский В. Г. Кинетика фазовых переходов воды в атмосфере. Л., изд. ЛГУ, 1965.
66. Качурин Л. Г., Гашин Л. И., Осипов Ю. Г. Управление структурой кристаллов, растущих в потоке аэрозоля.— ДАН СССР, 1962, т. 147, № 4.
67. Клинов Ф. Я. Гололед и изморозь в нижнем 300-метровом слое атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1970.
68. Клинов Ф. Я. К исследованиям гололедно-изморозевых отложений в нижнем 300-метровом слое атмосферы.— Труды ГГО, 1966, вып. 200.
69. Кравченко В. И. Некоторые данные по структуре ветра.— Изв. АН СССР, сер. энергетическая. 1956, вып. 11.
70. Кречмер С. И. К вопросу об изменчивости направления ветра.— Труды Геофиз. ин-та АН СССР, № 3, 1960.
71. Левин Л. М. Об осаждении частиц из потока аэрозоля на препятствия.— ДАН СССР, 1953, т. 91, № 6.
72. Леухина Г. Н. Опасные гололедообразования в условиях Средней Азии.— Труды САРНИГМИ, 1968, вып. 14(56).
73. Мазин И. П. Расчет отложения капель на круглых цилиндрических по верхностях.— Труды ЦАО, 1952, вып. 7.
74. Мазин И. П. Физические основы обледенения самолетов. М., Гидрометеиздат, 1957.
75. Мазин И. П., Минервин В. Е., Бурковская С. Н. Некоторые новые данные о водности облаков.— Труды ЦАО, 1958, вып. 19.
76. Минервин В. Е. Сезонные изменения водности облаков.— Труды ЦАО вып. 36, 1961.

77. Минервин В. Е. Водозапасы облаков.—Труды ЦАО, 1965, вып. 64.
78. Михеев М. А. Основы теплопередачи. М.—Л., Госэнергоиздат, 1949.
79. Молчанов П. А. Обледенение и задачи аэрологии.—«Гражданская авиация», 1937, № 10.
30. Муретов Н. С. Гололед и изморозь в районе железных дорог. М., Трансжелдориздат, 1935.
31. Муретов Н. С. Организация изучения явлений обледенения проводов.—«Метеорология и гидрология», 1957, № 2.
32. Половина И. П. Водозапасы слоистых и слоисто-кучевых облаков в холодное полугодие над Украиной.—Труды УкрНИГМИ, 1965, вып. 47.
33. Раевский А. Н. К вопросу о повторяемости гололеда.—«Метеорология и гидрология», 1953, № 1.
34. Руднева А. В. Максимальная величина отложения льда на проводах на территории СССР.—Труды ГГО, 1958, вып. 85.
35. Руднева А. В. Интенсивность обледенения проводов, подвешенных на различной высоте над поверхностью земли в центральной части ЕТС.—Труды ГГО, 1956, вып. 57(119).
36. Руднева А. В. Гололед и обледенение проводов на территории СССР. Л., Гидрометеиздат, 1960.
37. Руководящие указания по расчету проводов и тросов воздушных линий электропередачи. М.—Л., Изд. «Энергия», 1965.
38. Русанов В. И. Синоптические условия образования редкого случая гололеда.—«Метеорология и гидрология», 1957, № 2.
39. Соломатина И. И. Интенсивность обледенения проводов на высотах по наземным данным.—Труды ГГО, 1956, вып. 57(119).
40. Справочник по климату СССР, вып. 18, ч. III. Ветер. Л., Гидрометеиздат, 1967.
41. Строительные нормы и правила. Ч. II, разд. А, гл. II (СНиП II-A-II-62). М., Госстрой СССР, 1962.
42. Туроверсв К. С. К вопросу анализа существующих способов вычисления гололедных и ветровых нагрузок.—«Метеорология и гидрология», 1939, № 7—8.
43. Указания по определению гололедных нагрузок СН 318-65. М., Госстрой СССР, 1966.
44. Физика облаков. Под ред. А. Х. Хргиана. Л., Гидрометеиздат, 1961.
45. Фишер Р. А. Статистические методы для исследований. М., Госстройиздат, 1958.
46. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. М., Изд. АН СССР, 1955.
47. Халтинер Дж. и Мартин Ф. Динамическая и физическая метеорология. М., ИЛ, 1960.
48. Химач М. А. Отложения льда из переохлажденных облаков и туманов.—Труды ГГО, 1956, вып. 57(119).
49. Хргиан А. Х. Новейшие исследования по физике слоистообразных облаков.—Труды ЦАО, 1962, вып. 47.
40. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. М.—Л., Гидрометеиздат, 1969.
41. Швер Ц. А. Повторяемость скоростей и направлений ветра при гололедно-изморозевых отложениях.—Труды ГГО, 1967, вып. 210.
42. Швер Ц. А. О расчете гололедно-ветровых нагрузок на линии связи и электропередачи. Труды Межведомственного совещания «Современное состояние и перспективы развития инструментальных наблюдений за гололедно-изморозевыми явлениями». Л., Гидрометеиздат, 1970.
43. Шкодин А. И. Некоторые сведения об условиях работы линий электропередач и связи в гололедных районах.—«Электричество», 1953, № 10.
44. Электротехнический справочник, ч. I. М., Госэнергоиздат, 1964.
45. Boyd D. W. Weather and building. Canadian building digest. National Research Council. Division of Building Research. February 1961.
46. Davenport A. I. The application of slender, line — like structures to a gusty wind. Proc. Inst. Civ. Eng., vol. 23, Nov. 1962.
47. Davenport A. I. The application of statistical concepts to the wind loading on structures. Proc. Inst. Civ. Eng., vol. 191, August 1961.

108. Davenport A. I. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in strong winds. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, vol. 87, April 1961.
109. Deacon E. L. Turbulent transfer of momentum in the lowest layers of the atmosphere. A Study of turbulent transfer in the Layers of air near the Ground. Melbourne, 1961.
110. Deacon E. L. Gust variation with height up to 150 m. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, vol. 81, No. 350, 1955.
111. Davidson B. E. Some turbulence and wind variability observation in the lee of mountain ridges. *J. Appl. Met.*, vol. 2, No. 4, 1963.
112. Frankenberger E., Rudloff W. Windmessungen in den Quickborn-Funkmasten 1947/48. Meteor. Amt., NW-Deutschland, Hamburg, 1949.
113. Heywood G. I. Wind structure near the ground and its relation to temperature gradient. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, vol. 57, No. 242, 1931.
114. Kölbig I., Beckert F. Regionale Unterschiede in auftreten von Nebelfrost. *Zeitschrift für Meteorologie*, Bd. 20, H., 1—6, 1968.
115. Macklin W. S., Payne J. P. A theoretical study of the ice accretion process. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, vol. 93, No. 396, 1967.
116. Morrel P., Fourrier Je. and Sitbon P. The occurrence of icing of Constant Level Balloons. *J. Appl. Met.*, vol. 7, No. 4, 1968.
117. Nutt J. The wind pressures on buildings and towers. *Civ. Eng. Publ. Works Rev.*, vol. 58, No. 679—680, 1963.
118. Sherlock R. H. Variation of wind velocity and Gusts with height. *Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.*, 78, 1952.
119. Sherlock R. H. Gust factors for design of buildings. *Inst. Ass. Structural Eng.*, vol. 8, No. 4, 1947.
120. Shiotani M. Some notes on the structure of wind and temperature field in the lowest air layers. *J. Meteor. Soc. Japan*, ser. II, vol. 41, No. 261—268, 1963.
121. Soma S. The properties of atmospheric turbulence in high winds. *J. Meteor. Soc. Japan*, ser. II, vol. 42, No. 6, 1964.
122. Woelber W. A. Wind structure and the assessment of wind loads. *The Structural Engineer*, vol. 39, No. 5, May 1961.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение	3
глава I. Распределение гололедно-изморозевых отложений в нижнем 300-метровом слое атмосферы	5
§ 1. Характеристика материала наблюдений	5
§ 2. Методика расчета толщины стенки гололеда	7
§ 3. Изменение с высотой характеристик гололедно-изморозевых отложений в нижних слоях атмосферы	9
§ 4. Повторяемость различных видов отложений, образующихся на высотных сооружениях в облаках нижнего яруса	17
глава II. Ветровой режим при гололедно-изморозевых явлениях в нижних слоях атмосферы	23
§ 1. Распределение скоростей ветра	24
§ 2. Вертикальные профили ветра	26
§ 3. Порывистость ветра	31
глава III. Интенсивность гололедообразования на высотных сооружениях	37
§ 1. Состояние вопроса	37
§ 2. Интенсивность нарастания отложений	39
§ 3. Статистическая оценка влияния водности облаков и скорости ветра на интенсивность гололедообразования	43
§ 4. Влияние температуры воздуха и скорости ветра на плотность отложений	48
глава IV. Методика расчета интенсивности обледенения высотных сооружений	51
§ 1. Основные положения	51
§ 2. Расчет полных интегральных коэффициентов захвата для проводов различного диаметра	53
§ 3. Определение коэффициента намерзания для условий обледенения высотных сооружений	57
§ 4. Экспериментальная проверка расчетной формулы	62
глава V. Гололедно-ветровые нагрузки	65
§ 1. Расчет статической части гололедно-ветровых нагрузок по данным наблюдений. Соотношение между весом отложения и ветровой нагрузкой	68
§ 2. Сравнение нормативных нагрузок с нагрузками, рассчитанными по данным наблюдений. Оценка динамической составляющей гололедно-ветровой нагрузки	73
Выводы	77
Приложения	80
Литература	94

Труды ГГО, вып. 311
Виктор Герасимович Глухов
**Метеорологические условия
образования гололеда
на высотных сооружениях**

Редактор Л. В. Царькова
Техн. редактор И. И. Миронова
Корректоры: Т. В. Алексеева, Н. А. Балкина

Сдано в набор 31/III 1972 г. Подписано к печати 14/IX
1972 г. М-08350. Бумага 60×90^{1/16}, типогр. № 1.
Печ. л. 6,25. Уч.-изд. л. 6,89. Тираж 750 экз. Индекс
МЛ-13. Заказ 315. Цена 48 коп.

Гидрометеиздат. Ленинград, В-53, 2-я линия, д. 23.

Сортавальская книжная типография Управления по
печати при Совете Министров Карельской АССР
Сортавала, Карельская, 42