

11 ВЕТРОВЫЕ НАГРУЗКИ

Ветровая нагрузка в соответствии со СП 20.13330.11 относится к кратковременным нагрузкам, не имеющим пониженного нормативного значения. Для некоторых типов сооружений (например, зданий АЭС) для ветровой нагрузки рассматривается экстремальное (особое) значение.

Проблема исследования ветровой нагрузки и расчета сооружений на ветровые воздействия распадается на три крупные подзадачи:

- * изучение ветрового режима местности, основанное на использовании результатов метеорологических и климатологических исследований;
- * оценка сил, вызываемых воздействием ветра на сооружение, которые изучаются на основе решений задач теоретической аэродинамики и данных экспериментальных исследований;
- * определение реакции сооружения на ветровую нагрузку, основанное, как правило, на решении задач статики и динамики сооружений.

11.1 Скорость ветра

Ветер вызывается разностью давления в атмосфере. Все перепады давления между различными точками земной поверхности прямо или косвенно связаны с перепадами температуры. Если в каком-то районе температура выше, воздух в нем нагревается и поднимается вверх, образуя внизу зону низкого давления, в которую начинает стекаться холодный воздух соседних районов. Чем больше разность давлений в двух областях, тем быстрее между ними движется воздух.

Таким образом, изменение скорости и направления ветра объясняется, главным образом, изменением температуры. Поэтому естественно ожидать периодических трендов, соответствующих годовому циклу, метеорологическому циклу (длительностью около 4 суток) и суточному циклу инсоляции.

И действительно, распределение мощности ветрового потока по частотам, полученное Ван дер Ховеном [14], имеет три пика, соответствующие этим трем циклам (рисунок ниже). Но она содержит еще один пик в области гораздо меньших периодов. Этот четвертый пик, называемый часто микрометеорологическим в противоположность первым трем макрометеорологическим пикам, объясняется турбулентностью, возникающей в потоке воздуха при его трении о поверхность земли.

Между микро- и макрометеорологическими пиками при значениях периодов от 5 ч до 10 мин имеется характерная область для очень малых ординат (спектральный "провал")- Справа от этого провала спектр соответствует порывам, вызываемым турбулентностью потока воздуха, и, следовательно, в большой степени зависит от местной шероховатости земной поверхности.



Рис. 7.1. Энергетический спектр Ван дер Ховена

Движение атмосферного воздуха можно представить, как сумму взаимодействующих потоков, характеризуемых масштабами от 1 мм до тысяч километров. В метеорологии обычно устанавливают три основные группы атмосферных движений:

микромасштабные — движения с характерными размерами менее 20 км и масштабом времени порядка 1 ч;

мезомасштабные — движения с характерными размерами от 20 до 500 км и масштабом времени от 1 до 48 ч;

синоптические — движения с характерными размерами, превышающими 500 км, и масштабом времени порядка 2 суток и более.

Поскольку основной причиной турбулентности воздушного потока является шероховатость местности, окружающей рассматриваемую площадку застройки, то средняя скорость ветра изменяется в зависимости от высоты над уровнем земли. Характерные профили скорости ветра в слое, подверженном турбулентности от взаимодействия потока воздуха с поверхностью земли, приведены на рисунке, из которого видно, что на некотором уровне трение потока воздуха о поверхность земли перестает влиять на его скорость. Этот уровень, обычно называемый градиентным уровнем, тем выше, чем больше шероховатость поверхности. Кроме того, высота этого уровня зависит от скорости ветра.

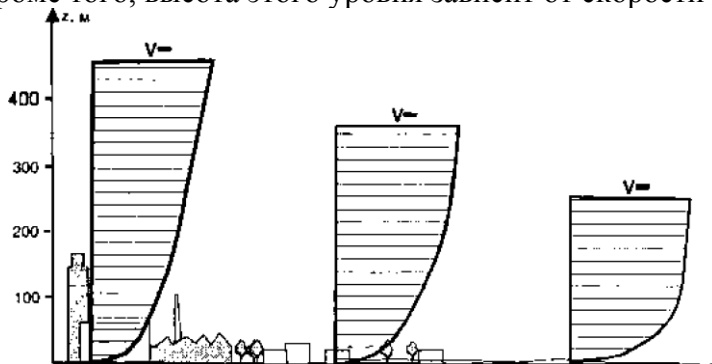


Рисунок - Изменение скорости ветра в зависимости от высоты над поверхностью земли

В СП 20 используется следующая классификация поверхностей:

А — открытые побережья морей, озер и водохранилищ, пустыни, степи, лесостепи, тундра;

В — городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой до 10 м;

С — городские районы с застройкой зданиями высотой свыше 25 метров.

Для этих поверхностей градиентный уровень принят равным 300, 350 и 480 м соответственно.

Ниже градиентного уровня скорость ветра, усредненная на некотором принятом интервале времени, может определяться логарифмическим или степенным законом;

$$V(z) = V_h \frac{\ln(z/z_h)}{\ln(z_h/z_0)} \quad V(z) = V_h (z/z_h)^\alpha$$

В формулах через $V(z)$ и V_h обозначены скорость ветра на уровне Z и на стандартной высоте установки измерительного прибора (обычно 10 м); Z_0 — параметр шероховатости подстилающей поверхности. СП использует степенную зависимость с показателем степени для указанных выше типов местности равным: $\alpha_A = 0,16$; $\alpha_B = 0,22$ и $\alpha_C = 0,33$. Эта зависимость лежит в основе табулированных значений коэффициента k , учитывающего изменение ветрового давления по высоте. Логарифмический закон нашел наибольшее применение в странах Центральной и западной Европы. Анализ наблюдений показал, что профили средних скоростей ветра на больших высотах точнее аппроксимируется степенной функцией, а в приземном слое атмосферы (до высоты 15-20 м) — логарифмической функцией.

Для холмистой местности в формулы вносятся поправки, которые корректируют значение скорости ветра V_{mf} на высоте z , соответствующее равнинной местности, до величины V_m .

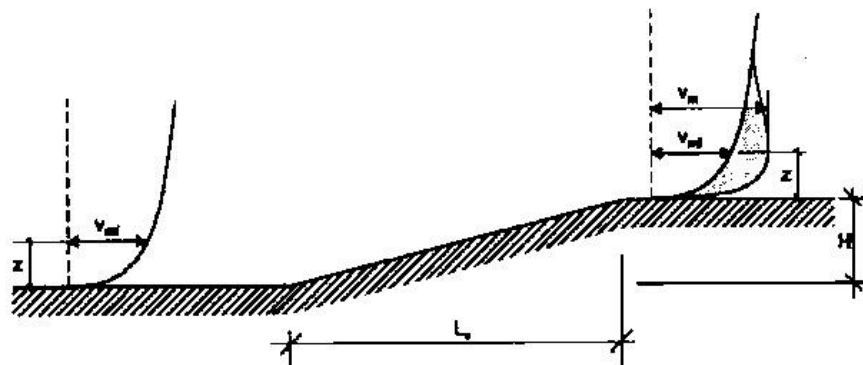


Рис. 7.3. Поправка к скорости ветра для холмистой местности

Основными характеристиками ветрового потока являются его скорость и направление.

Изначально оценка скорости («силы ветра») ветра давалась по ощущению, по степени воздействия ветра на суше и море. Мореплаватели ввели в обращение следующие оценки силы ветра: штиль; тихая погода; слабый ветер; небольшой бриз; малый ветер; свежий ветер; топсельный ветер; крепкий ветер; сильный шквал; свирепый ветер; шторм; ураган. Эти названия использовал английский адмирал Бофорт в своей двенадцатибалльной шкале, которая была предложена в 1806 году. С некоторыми коррективами она используется до сих пор.

В настоящее время характеристики ветрового потока измеряются разнообразными приборами (чаще всего анеморумбометрами), и график записи скорости ветра, измеренной таким прибором, будет иметь вид, изображенный на рис. 7.4,а.

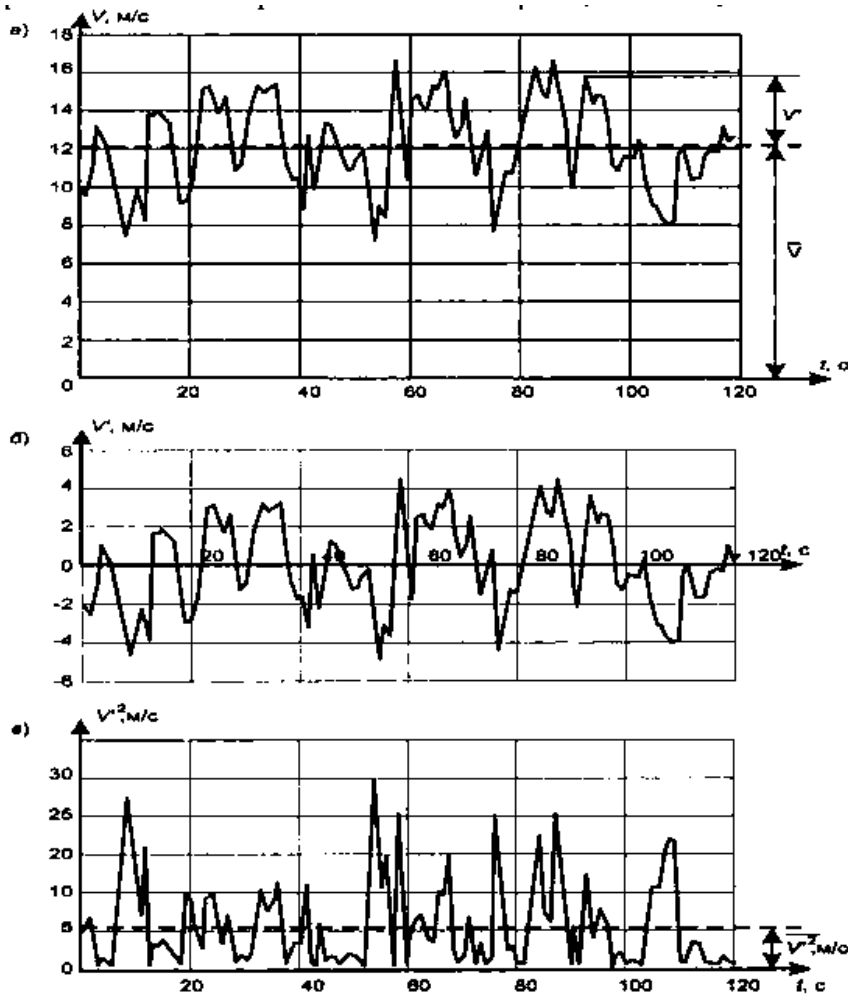


Рис. 7.4. Структура скорости ветра: а — запись скорости, б — пульсационная составляющая; в — мощность пульсаций

Пики и впадины на этой кривой появляются за счет движения вихрей вокруг точки, в которой измерялась скорость ветра. Наиболее удобно представить истинную скорость турбулентного потока в данный момент времени как сумму средней скорости \bar{V} и пульсационной скорости V' : $V = \bar{V} + V'$

$$\bar{V} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} v dt.$$

Пульсационная составляющая характеризуется коэффициентом пульсаций

$$I = \frac{\sqrt{\overline{V'^2}}}{\bar{V}}.$$

$\zeta = \frac{\bar{V} + V'}{\bar{V}}$ или интенсивностью турбулентности

В настоящее время интервал осреднения Δt чаще всего принимается равным 10 минутам, хотя используются и другие значения, например, 3 сек (США) или 1 час (Великобритания). Изменение времени осреднения естественно меняет значение средней скорости ветра — чем больше время осреднения, тем меньше его средняя скорость. В частности» переходом от двухминутного к десятиминутному времени осреднения объясняется уменьшение нормативного значения ветрового напора при замене ранее действовавших норм [1974 г] на современные.

Для измерений характеристик ветра на метеостанциях в настоящее время используются анеморумбометры М-63М (или их модификации), которые обеспечивают автоматическое измерение средней скорости за **10 минут** в диапазоне 1-40 м/с, максимальной скорости (до 60 м/с) и направления ветра. В качестве запасного прибора на метеостанциях имеются комплекты флюгеров Г. Вильда с легкой и тяжелой досками для измерения скорости ветра от 0 до 40 м/с.

Вплоть до начала 70-х годов XX века проводились лишь флюгерные метеонаблюдения. При этом определяли среднюю скорость ветра, максимальную скорость (порыв) в срок наблюдений, а также направление ветра. Для определения скорости ветра наблюдается колебание доски в течение **2 минут** и определяется ее среднее положение за этот промежуток времени. Таким способом получают **осредненное на 2-минутном интервале значения скорости ветра**, которое используется для нормирования ветрового напора. Одновременно отмечается и самое большое отклонение доски за указанный период — скорость порыва ветра.

11.2 Ветровое давление

Ветровая нагрузка на здания и сооружения определена в нормах СП 20 как сумма средней и пульсационной составляющих. При проектировании массивных и невысоких зданий и сооружений динамическим действием ветровой нагрузки пренебрегают. Более существенно ее влияние на высокие и гибкие сооружения.

В конструкциях башен, мачт и т. п. порывы ветра вызывают колебания, частота которых зависит от свойств (формы, размеров, условий закрепления) самих конструкций. При больших частотах собственных колебаний сооружения не приходится опасаться резонансных эффектов. При частоте собственных колебаний менее 4 Гц высоких сооружений, зданий высотой более 40 м и т. п. учет динамической составляющей ветровой нагрузки обязателен. Кроме того, для гибких высоких сооружений цилиндрической формы (мачты, башни, дымовые трубы и т. п.) выполняется расчет на резонанс, который может возникнуть при определенных скоростях ветра, когда происходит срыв вихрей в турбулентном потоке с частотой, совпадающей с собственной частотой поперечных колебаний сооружения.

Нормативное значение средней составляющей ветрового давления определяется как

$$w_n = w_0 k c$$

где w_0 - ветровое давление на единицу поверхности (скоростной напор); $w_0 = \frac{\rho v_0^2}{2}$

где

ρ - плотность воздуха,

v_0 - скорость ветра,

k - коэффициент, учитывающий изменение давления ветра по высоте и тип местности;

c - аэродинамический коэффициент (коэффициент лобового сопротивления сооружения).

Плотность воздуха ρ зависит от давления и температуры. Для обычного диапазона температур и при не очень большой высоте сооружения переменной плотности воздуха можно пренебречь. Тогда формула преобразуется к виду $w_0 = 0,613v_0^2$ где скорость v_0 измеряется в м/с, а напор w_0 в Па.

Если скорость ветра на метеостанции измерялась флюгером Г. Вильда, дающим

$$\alpha = 0,75 + \frac{5}{v_0}$$

ошибку до 4 - 6 м/с, то используют поправку

формулу $w_0 = 0,613(\alpha v_0)^2$ При использовании для измерений малоинерционных анемометров коэффициент α принимается равным 1.

Стандартная высота измерения скорости ветра - 10 м. При расположении измерительного прибора на другой высоте, что присутствует на ряде метеостанций, измеренная

$$V_h = \left(\frac{h}{10}\right)^\alpha V_{10}$$

скорость корректируется в соответствии с выражением:

где V_h - средняя скорость ветра на высоте h , м/с,

V_{10} - средняя скорость ветра на высоте 10 м, м/с,

h - высота установки измерительного прибора, м,

α - коэффициент, зависящий от типа местности, принимаемый равным 0,16 - для местности типа А, 0,28 - для местности типа В и 0,40 - для местности типа С.

Скорость ветра v_0 ранее принималась при двухминутном интервале осреднения, поскольку за основу нормирования принимались данные метеонаблюдений при флюгерных измерениях. При переходе на анемометрические наблюдения интервал осреднения увеличился до 10 минут, что в общем случае должно снижать осредненную скорость ветра по сравнению с 2-минутным осреднением. При составлении действующих норм СП 20 в середине 80-х годов прошлого века еще не было достаточной статистической базы результатов измерений по новой методике. Поэтому было принято волевое решение: считать, что скорость ветра, осредненная на 10-минутном интервале, составляет 0,92 от осредненной на 2-минутном интервале. В соответствии с этим ветровой напор w_0 при этом должен снизиться на 15 % (0,922 - 0,85).

В качестве примера в таблице ниже приведены значения скоростного напора w_0 по ранее действовавшему СНиП II-6-74 и по ныне действующим нормам. Давление ветра w_0 установлено для восьми районов, на которые разделена территория страны на основе статистического анализа климатических данных по скоростям ветра, являющимся случайной функцией времени. Распределение горизонтальных составляющих скорости ветра по румбам определяет розу ветров данной местности. В некоторых случаях при явно выраженном господствующем направлении ветров учет этого фактора может дать экономию при проектировании зданий и сооружений. Однако в нормах направление ветра не учитывается, считается, что он может оказывать давление на сооружения равномерно с любой стороны.

Значения W_0 в этой таблице по ныне действующим нормам составляют (с округлением) 0,85 от значений старого СНиПа.

Таблица - Скоростной напор ветра (нормативные значения)

Ветровой район		a	I	II	III	IV	V	VI	VI	VI
w (Па)	СНиП II-6-74	00	70	50	50	50	00	50	000	
	СП 20.13330.11	70	30	00	80	80	00	30	50	

Расчетное значение средней составляющей ветровой нагрузки определяется умножением нормативной на коэффициент надежности по нагрузке γ_f . Ранее в СНиП II-6-74 он принимался равным 1,2. В ныне действующих нормах было решено сохранить расчетные значения ветровой нагрузки такими же, как в старом СНиПе. Для этого коэффициент γ_f увеличили до 1,4, при этом расхождения со старыми значениями без учета округлений оказываются меньше 1 %:

$$0,85 \times 1,4 = 1,19 \approx 1,2.$$

Расчетное ветровое давление в нормах было установлено из условия превышения примерно один раз в 15 лет для 2-минутного интервала осреднения. При 10-минутном интервале то же численное значение уже соответствует периоду примерно 50 лет. Таким образом, создается видимость повышения надежности проектирования по ныне действующим нормам в сравнении с предшествующей редакцией норм (период однократного превышения увеличился более чем в 3 раза). В некоторых литературных источниках это прямо утверждается. На самом же деле произошла подмена расчетного параметра v_0 вследствие изменения методики измерения средней составляющей – увеличения в 5 раз интервала осреднения скорости ветра.

Скорость ветра и соответственно ветровое давление зависят от высоты над землей. Для описания изменения скорости ветра по высоте используется так называемый профиль ветра. В нормах проектирования для его описания использован степенной закон.

$$v(Z) = v_0 \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^\alpha$$

где v_0 - скорость ветра на стандартной высоте расположения измерительного прибора – флюгера или анемометра $Z_0=10$ м (при высоте до 5 м скорость ветра принята постоянной);

Z - уровень, на котором определяется скорость $v(Z)$;

α - показатель степени, зависящий от шероховатости подстилающей поверхности, воздухообмена между слоями, скорости ветра.

В зависимости от шероховатости поверхности различают местности типов *A*, *B* и *C*. К типу *A* относятся открытые местности с ровной поверхностью: побережья морей, озер, водохранилищ, пустыни, степи, лесостепи, тундра. К типу *B* отнесены городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м. Тип *C* - городские районы с застройкой зданиями высотой более 25 м.

Сооружения считаются расположенными в местности данного типа, если эта местность сохраняется с наветренной стороны на расстоянии $30h$ при высоте сооружения h до 60 м и 2 км - при большей высоте.

Рассмотрим влияние основных факторов на особенности вертикальных профилей скоростного напора.

Стратификация атмосферы (изменение температуры воздуха по высоте) характеризуется градиентом температуры. Среднее значение градиента $\gamma = 0,6 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ м}$ соответствует уменьшению температуры воздуха на $0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ при подъеме на каждые 100 м.

В каждый отдельный момент времени γ может отклоняться в ту или иную сторону и даже принимать отрицательное значение (так называемая инверсия температуры). При малых вертикальных градиентах или инверсиях вертикальные перемещения воздушных масс затухают. Стратификация атмосферы в таком случае называется устойчивой (в противном случае неустойчивой). При устойчивой стратификации уменьшается перемешивание воздуха разных слоев восходящими потоками. Поэтому вертикальные градиенты скорости ветра становятся большими, чем при неустойчивой стратификации. С увеличением скорости ветра различие скоростей разных слоев вертикального профиля уменьшается.

Шероховатость подстилающей поверхности является одним из основных факторов, влияющих на формирование профилей скорости ветра в пограничном слое атмосферы. В Руководстве [33] приведены данные измерений в пунктах с разной степенью шероховатости: пустыни и горы, луга и крупные города. Измерения производились на высотах до 300 м. Их результаты свидетельствуют, что показатель степени α в формуле (7.15) изменяется в широких пределах. Над ровной поверхностью он существенно меньше, чем над пересеченной и неоднородной. Наибольшее влияние на величину α оказывает непосредственное окружение объекта. С ростом масштаба шероховатости подстилающего слоя показатель степени возрастает от 0,08 до 0,51.

Скорость ветра у земли также оказывает влияние на характер вертикального профиля. С усилением ветра показатель степени, как правило, уменьшается. При очень сильном ветре у поверхности земли близко к нулю, то есть скорость ветра выравнивается по высоте во всем слое. С учетом всех этих факторов на основе исследований Главной геофизической обсерватории в нормах приняты осредненные показатели степени для местностей типов А, В, С, равные соответственно 0,1, 0,2 и 0,3.

Влияние горизонтальной протяженности объекта строительства на выбор расчетного значения скоростного напора ветра изучено в меньшей степени. Для большинства объектов промышленного и гражданского строительства, размеры которых по горизонтали не превышают нескольких десятков или сотен метров, учет изменчивости напора ветра вдоль фронта потока большого значения не имеет. Однако, для объектов большой протяженности типа линий электропередач (ЛЭП) и т.п. надежность зависит от длины: чем она больше, тем выше вероятность появления скорости ветра на каком-либо участке, способной разрушить хотя бы одну из опор и вывести линию из строя.

А.Р. Ржаницын отмечал, что имеется весьма мало данных о характере корреляционных функций для пространственных распределений скорости ветра и о величине зон корреляции для различных случаев. Он предложил приближенную оценку увеличения вероятности превышения расчетной ветровой нагрузки для протяженных объектов.

Разрушающее значение силы ветра появляется в результате больших перепадов давления при вихревом движении воздуха, когда возникает смерч (за рубежом его называют торнадо). Если известна ширина полосы сильного ветра d , и можно считать, что скорости ветра на расстояниях, больших, чем d , корреляционно не связаны, то можно определить вероятность улавливания сильного ветра весьма протяженными объектами длиной l по

общим формулам, справедливым для малых объектов, но с увеличенным приведенным сроком службы.

$$T_{np} = T \frac{l}{d} \quad \text{где } T - \text{ расчетный срок службы сооружения. Пространственное}$$

распределение ветра здесь заменяется временным.

11.3 Ветровая нагрузка в нормах проектирования

Нагрузки и воздействия, возникающие при взаимодействии ветра со строительными конструкциями, по своей природе можно разделить на два типа:

- воздействия, связанные с непосредственным действием на здания и сооружения максимальных для места строительства ураганных ветров;

- воздействия, вызывающие интенсивные аэроупругие и неустойчивые изгибные, крутильные и изгибно-крутильные колебания.

Воздействия первого типа называются расчетной ветровой нагрузкой, и она подразделяется на среднюю и пульсационную составляющие.

К колебаниям второго типа относятся различные формы аэродинамической неустойчивости сооружений (в частности, применительно к высоким зданиям это могут быть галопирование и дивергенция), а также колебания, связанные со срывом вихрей с внешней поверхности сооружений и приводящие к резонансному вихревому возбуждению сооружения на одной из его собственных частот. Колебания этого типа могут возникнуть в зданиях и сооружениях, высота которых значительно превышает их поперечный размер. В связи с этим соответствующие воздействия не учитываются при проектировании невысоких зданий.

По СП 20.13330.2011 п.11:

Для зданий и сооружений необходимо учитывать следующие воздействия ветра:

- а) основной тип ветровой нагрузки (в дальнейшем - «ветровая нагрузка»);
- б) пиковые значения ветровой нагрузки, действующие на конструктивные элементы ограждения и элементы их крепления;
- в) резонансное вихревое возбуждение;
- г) аэродинамические неустойчивые колебания типа галопирования, дивергенции и флаттера (см. также раздел 14).

Резонансное вихревое возбуждение и аэродинамические неустойчивые колебания типа галопирования необходимо учитывать для зданий и сплошностенчатых сооружений, у которых $h/d > 10$, где h - высота, d - характерный поперечный размер.

Нормативное значение ветровой нагрузки w следует определять как сумму средней w_m и пульсационной w_p составляющих

$$w = w_m + w_p. \quad (11.1)$$

При определении внутреннего давления w_i пульсационную составляющую ветровой нагрузки допускается не учитывать (*нормальное давление w_i приложено к внутренним поверхностям сооружений с проницаемыми ограждениями, с открывающимися или постоянно открытыми проемами*).

11.3.1 Средняя составляющая ветровой нагрузки

Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки w_m в зависимости от эквивалентной высоты z_e над поверхностью земли следует определять по формуле

$$w_m = w_0 k(z_e) c, \quad (11.2)$$

где

w_0 - нормативное значение ветрового давления

Нормативное значение ветрового давления w_0 принимается в зависимости от ветрового района по таблице 11.1.

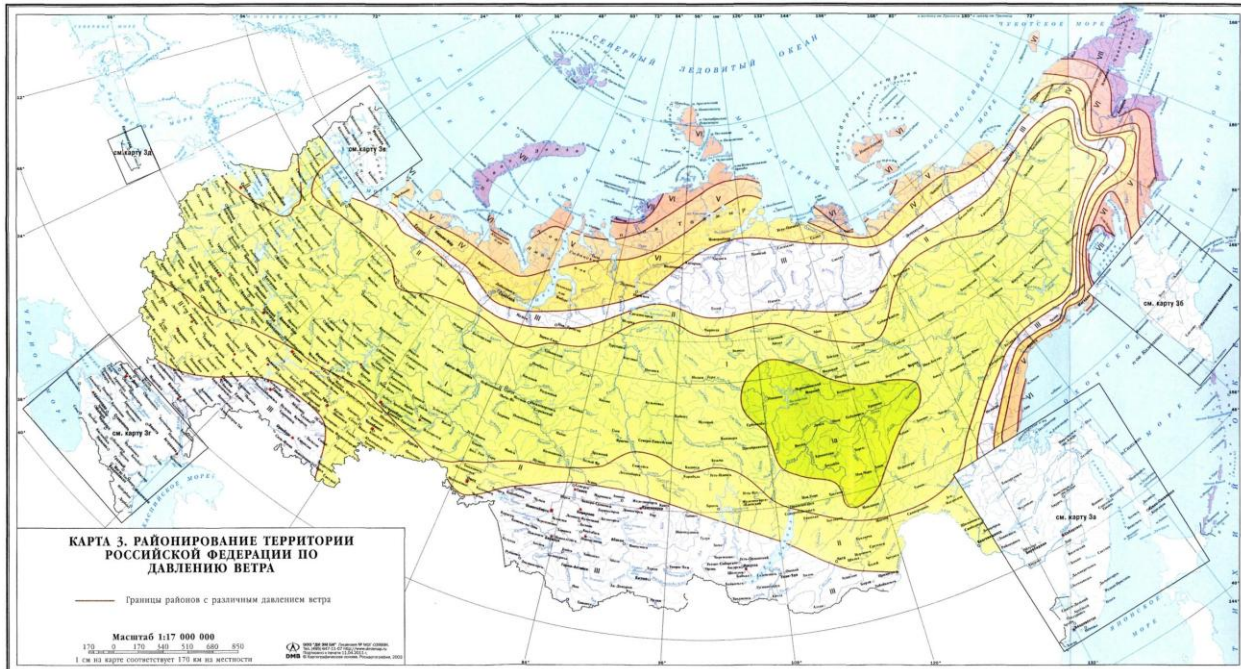


Таблица 11.1

Ветровые районы (принимаются по <u>карте 3</u> <u>приложения Ж</u>)	a	I	I	I	II	V	I	I	II
w_0 , кПа	,17	,23	,30	,38	,48	,60	,73	,85	

Нормативное значение ветрового давления допускается определять в установленном порядке на основе данных метеостанций Росгидромета (см. 4.4). В этом случае w_0 , Па, следует определять по формуле

$$w_0 = 0,43v_{50}^2, \quad (11.3)$$

где v_{50}^2 - давление ветра, соответствующее скорости ветра, м/с, на уровне 10 м над поверхностью земли для местности типа А (11.1.6), определяемой с 10-минутным интервалом осреднения и превышаемой в среднем один раз в 50 лет.

$k(z_e)$ - коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления для высоты z_e ;

Эквивалентная высота z_e определяется следующим образом (п.11.1.5).

1. Для башенных сооружений, мачт, труб и т.п. сооружений

$$z_e = z.$$

2. Для зданий:

а) при $h \leq d \rightarrow z_e = h$;

б) при $h \leq 2d$:

для $z \geq h - d \rightarrow z_e = h$;

для $0 < z < h - d \rightarrow z_e = d$;

в) при $h > 2d$:

для $z \geq h - d \rightarrow z_e = h$;

для $d < z < h - d \rightarrow z_e = z$;

для $0 < z \leq d \rightarrow z_e = d$.

Здесь z - высота от поверхности земли;

d - размер здания (без учета его стилобатной части) в направлении, перпендикулярном расчетному направлению ветра (поперечный размер);

h - высота здания.

Коэффициент $k(z_e)$ определяется по таблице 11.2 или по формуле (11.4), в которых принимаются следующие типы местности:

А - открытые побережья морей, озер и водохранилищ, сельские местности, в том числе с постройками высотой менее 10 м, пустыни, степи, лесостепи, тундра;

В - городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м;

С - городские районы с плотной застройкой зданиями высотой более 25 м.

Сооружение считается расположенным в местности данного типа, если эта местность сохраняется с наветренной стороны сооружения на расстоянии $30h$ - при высоте сооружения h до 60 м и на расстоянии 2 км - при $h > 60$ м.

Примечание - Типы местности могут быть различными для разных расчетных направлений ветра.

Таблица 11.2

Высота z_e , м	Коэффициент k для типов местности		
	А	В	С
≤ 5	0,75	0,5	0,4
10	1,0	0,65	0,4
20	1,25	0,85	0,55
40	1,5	1,1	0,8
60	1,7	1,3	1,0
80	1,85	1,45	1,15
100	2,0	1,6	1,25
150	2,25	1,9	1,55
200	2,45	2,1	1,8
250	2,65	2,3	2,0
300	2,75	2,5	2,2
350	2,75	2,75	2,35
≥ 480	2,75	2,75	2,75

Коэффициент может быть также рассчитан по формуле

$$k(z_e) = k_{10}(z_e/10)^{2\alpha}. \quad (11.4)$$

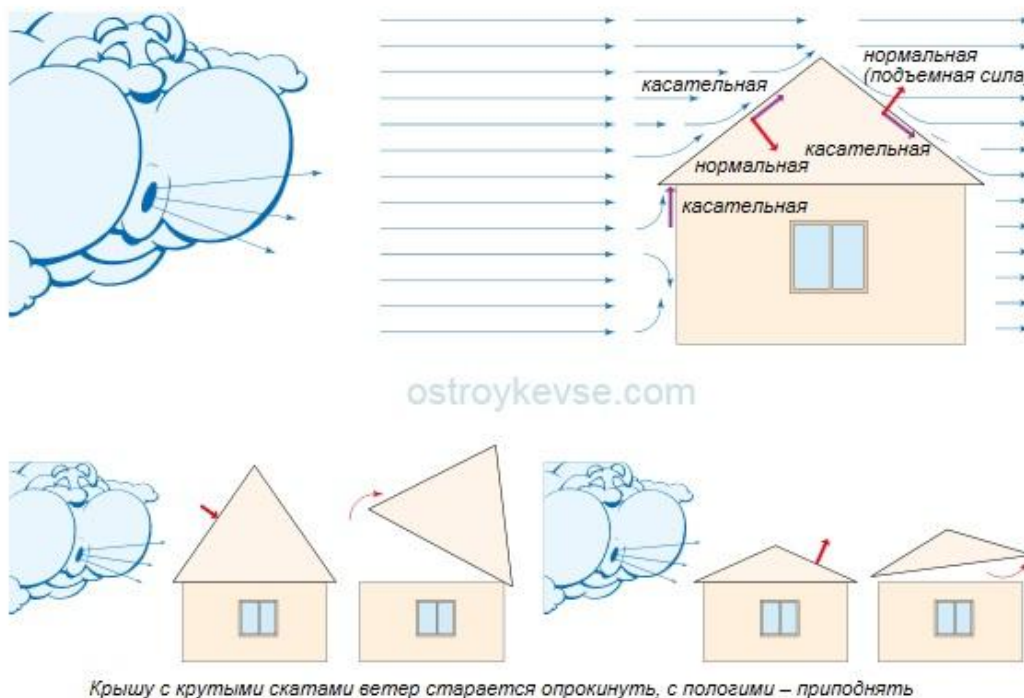
Значения параметров k_{10} и α для различных типов местностей приведены в таблице 11.3.

Таблица 11.3

Параметр	Тип местности		
	А	В	С
α	0,15	0,20	0,25
k_{10}	1,0	0,65	0,4
ζ_{10}	0,76	1,06	1,78

c - аэродинамический коэффициент принимается по Приложению Д.1 Аэродинамические коэффициенты

Аэродинамические коэффициенты: внешнего давления c_e , трения c_f , внутреннего давления c_i и лобового сопротивления c_x , поперечной силы c_y , крутящего момента c_z , принимают по приложению Д.1, где стрелками показано направление ветра. Знак «плюс» у коэффициентов c_e или c_i соответствует направлению давления ветра на соответствующую поверхность (активное давление), знак «минус» - от поверхности (отсос). Промежуточные значения нагрузок следует определять линейной интерполяцией.



c - аэродинамические коэффициенты сил (c_x и c_y), крутящего момента (c_m) или давления (c_p);

- Д.1.1 Отдельностоящие плоские сплошные конструкции
- Д.1.2 Прямоугольные в плане здания с двускатными покрытиями
- Д.1.3 Прямоугольные в плане здания со сводчатыми и близкими к ним по очертанию
- Д.1.4 Круглые в плане здания с купольными покрытиями
- Д.1.5 Здания с продольными фонарями
- Д.1.6 Здания с зенитными фонарями
- Д.1.8 Здания с уступами
- Д.1.9 Здания, постоянно открытые с одной стороны
- Д.1.10 Навесы
- Д.1.11 Сфера
- Д.1.12 Сооружения и конструктивные элементы с круговой цилиндрической поверхностью
- Д.1.13 Призматические сооружения
- Д.1.14 Решетчатые конструкции
- Д.1.15 Учет относительного удлинения
- Д.1.16 Учет шероховатости внешней поверхности
- Д.1.17 Пиковые значения аэродинамических коэффициентов для прямоугольных в плане зданий

Для рассмотрения основных закономерностей аэродинамического действия ветрового потока на препятствие рассмотрим поведение потока в некоторой струйке и запишем для нее

$$\rho V_0^2 / 2 + p_0 = \rho V_1^2 / 2 + p_1$$

уравнение Бернулли:

где V_0 и V_1 — скорость струи в сечениях 0-0 и 1-1, p — давления в тех же сечениях, ρ — плотность воздуха.

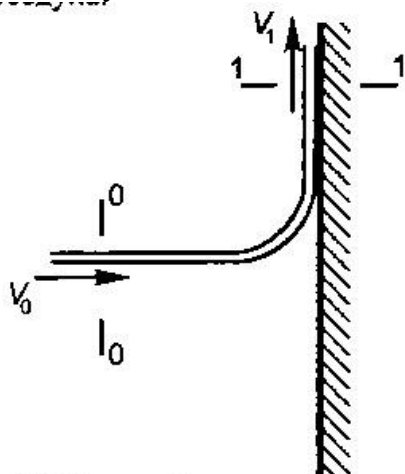


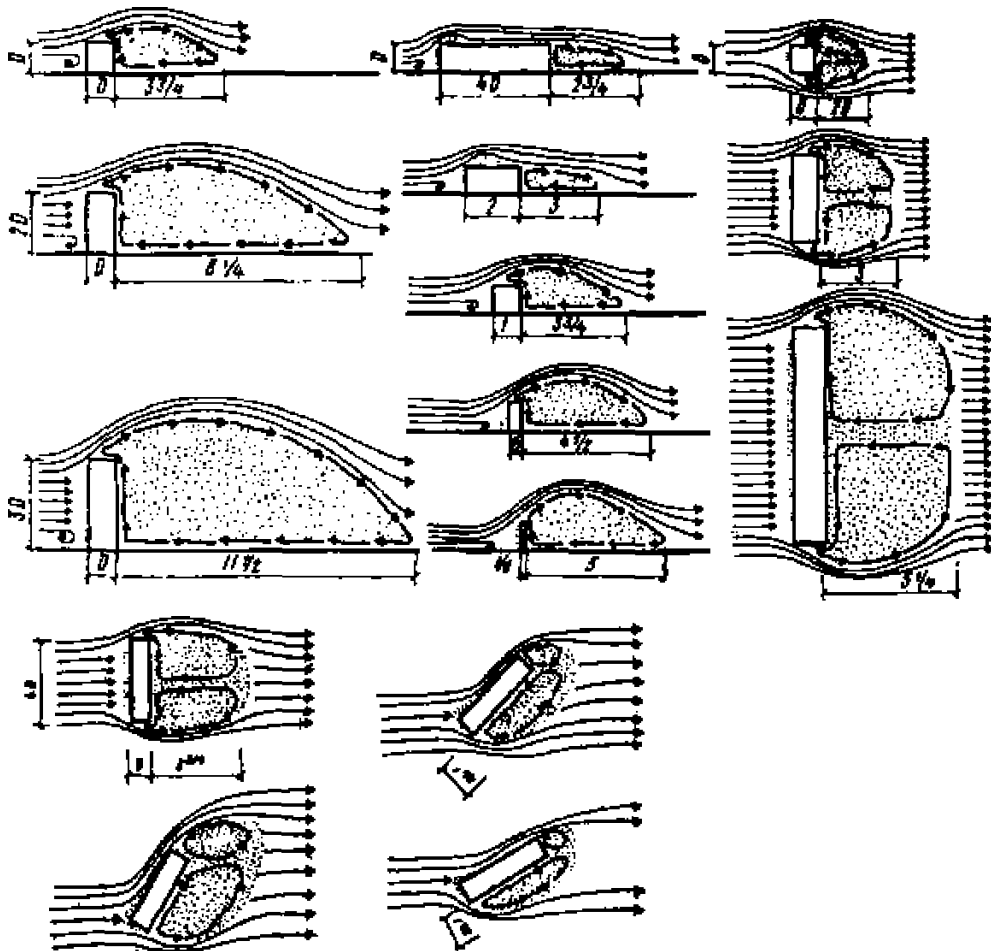
Рис. 7.5. Схема обтекания препятствия

Коэффициент пропорциональности $C = 1 - (V_1/V_0)^2$ называют аэродинамическим коэффициентом. Он определяет ту долю скоростного напора, которая переходит в ветровое давление и обычно находится из экспериментов в аэродинамической трубе.

Такого рода эксперименты выполнены для многих типовых моделей зданий и сооружений, в этих опытах устанавливался характер обтекания и замерялись значения давления в характерных точках

Каждое здание с точки зрения аэродинамики является плохообтекаемым препятствием. На рисунке ниже изображена картина обтекания производственного здания потоком воздуха, где ясно видны зоны вихреобразования, зона турбулентности, которые и определяют распределение ветрового давления по наружным поверхностям здания. Вихреобразование носит особенно интенсивный характер в заветренной области (в зоне аэродинамической тени).

Размеры этой области зависят от геометрических характеристик обтекаемого тела и от направления ветрового потока. Некоторые экспериментальные результаты, приведены ниже.



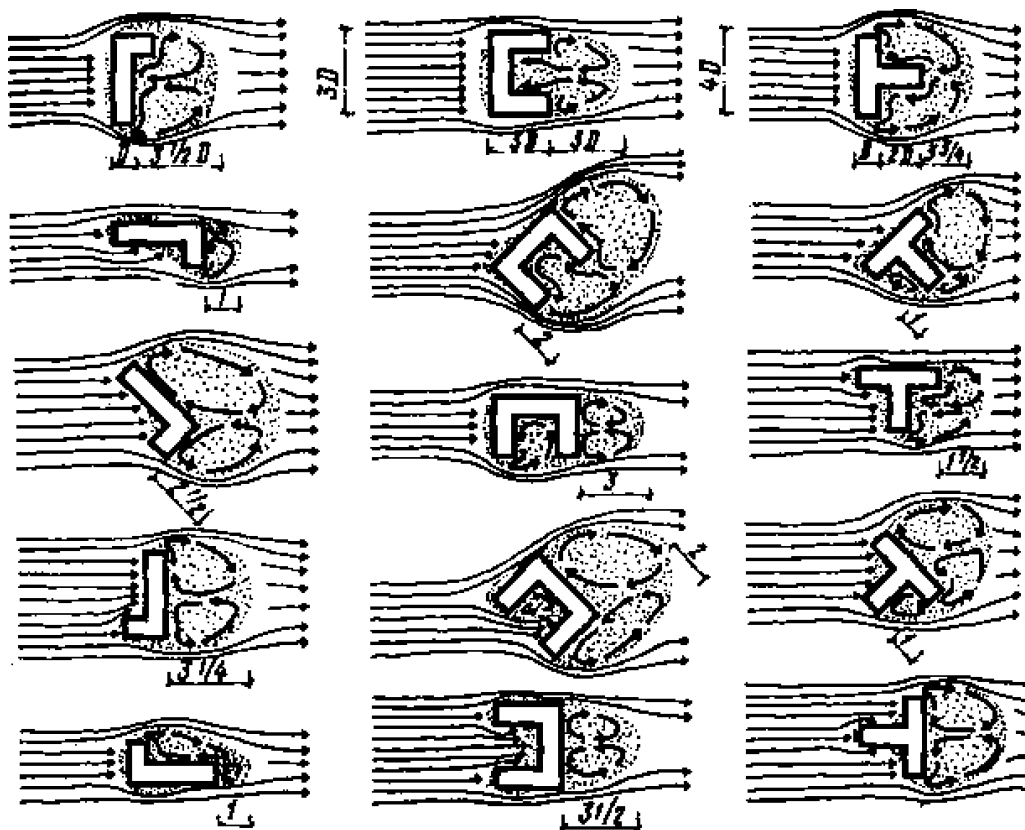


Рисунок - . Перераспределение зон вихреобразования при изменении направления ветра

Все это следует иметь в виду, используя рекомендации различных нормативных документов, например приложений и рекомендаций к СНиП и СП, например, «Временные рекомендации по назначению нагрузок и воздействий, действующих на многофункциональные высотные здания и комплексы в Москве, МДС 20-1.2006).

И еще одно важное замечание: аэродинамические коэффициенты, рекомендуемые нормами, как бы они ни отличались друг от друга, относятся ко вполне определенной геометрической конфигурации здания, причем это, как правило, достаточно простые конфигурации. Вместе с тем современная практика строительства все чаще демонстрирует переход к усложненным объемно-планировочным решениям, и возникает желание каким-то образом перенести данные с одного случая на другой.

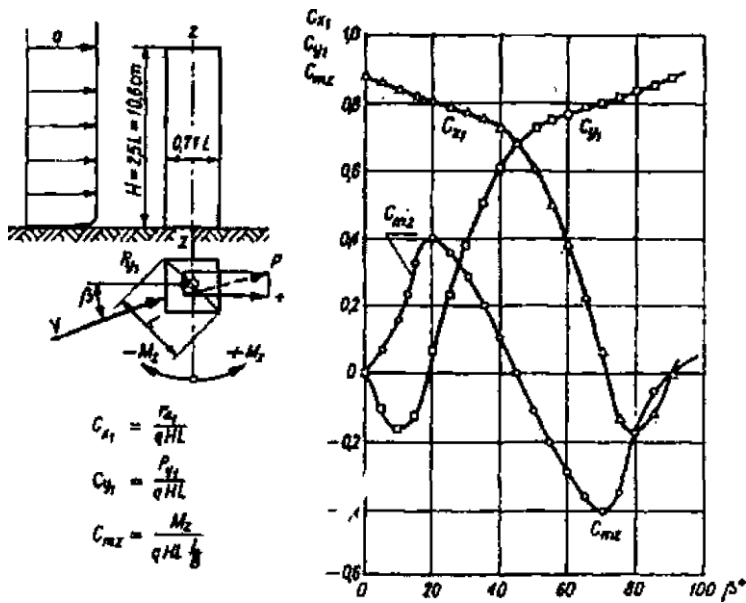
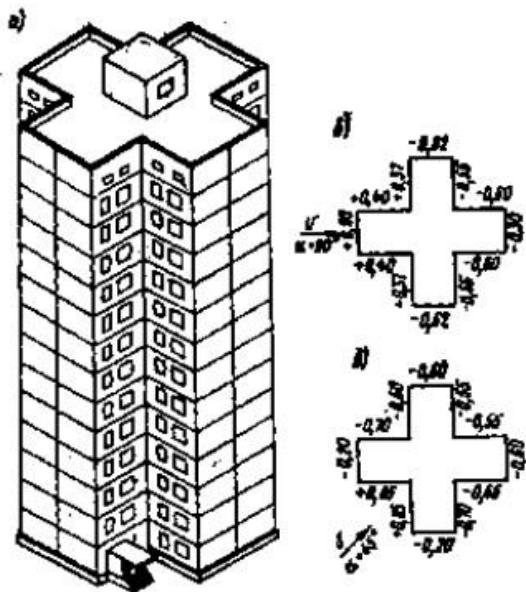


Рис. 7.12. Значения аэродинамических коэффициентов

О том, что это не совсем корректная процедура, свидетельствуют данные, представленные на рисунке ниже, где показано распределение значений аэродинамических коэффициентов по периметру здания, имеющего крестообразную форму плане при двух направлениях ветрового потока.



Аэродинамические коэффициента здания с крестообразным планом

Альтернативный подход основан на использовании данных из технической периодики и или нормативных документов других стран. Например, данные из источников КНР показывают:

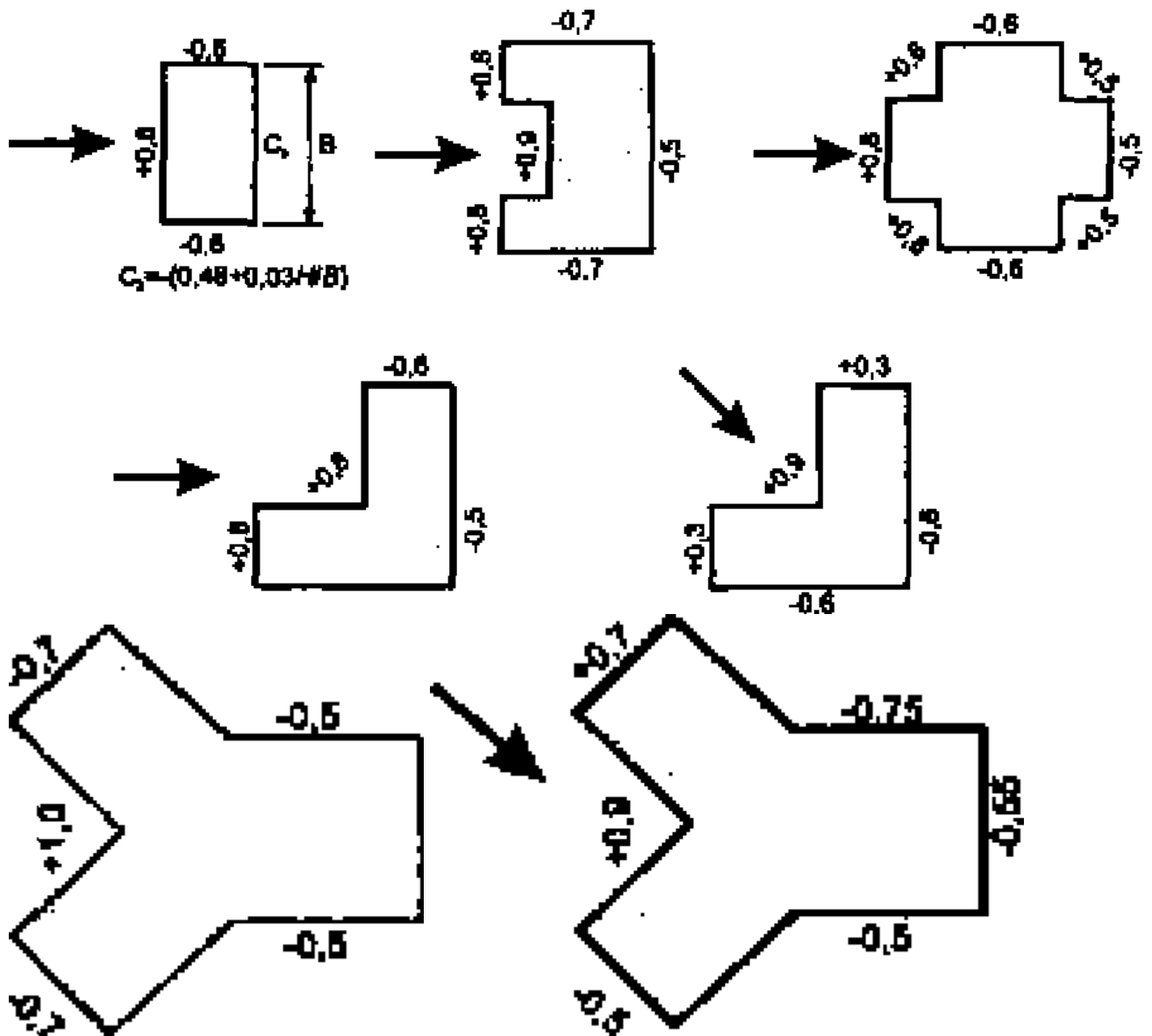
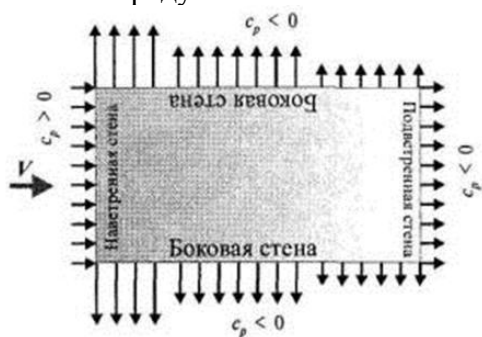


Рисунок - Аэродинамические коэффициента зданий по нормам КНР

В новом СП20.13330.11, в отличие от СНиП, введено зонирование, как и в Еврокодах. Рассмотрим пример – здание с с квадратным основанием 16x16 м и высотой 48 м, угол покрытия около 15 градусов.



Д.1.2 Прямоугольные в плане здания с двускатными покрытиями

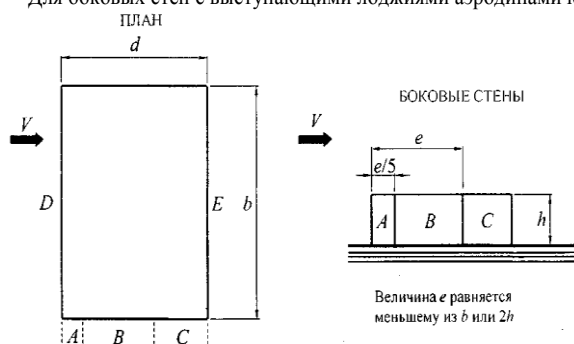
Вертикальные стены прямоугольных в плане зданий

Таблица Д.2

Боковые стены			Наветренная стена	Подветренная стена
Участки				
A	B	C	D	E
-1,0	-0,8	-0,5	0,8	-0,5

Для наветренных, подветренных и различных участков боковых стен (рисунок Д.3) аэродинамические коэффициенты c_e приведены в таблице Д.2.

Для боковых стен с выступающими лоджиями аэродинамический коэффициент трения $c_f = 0,1$.





Коэффициенты (с) для двускатных покрытий:

таблица 3

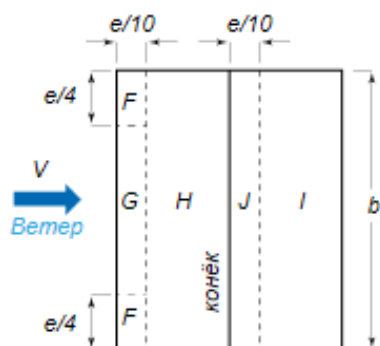
при ветре в скат крыши

уклон α	F	G	H	I	J
15°	-0,9	-0,8	-0,3	-0,4	-1,0
	0,2	0,2	0,2		
30°	-0,5	-0,5	-0,2	-0,4	-0,5
	0,7	0,7	0,4		
45°	0,7	0,7	0,6	-0,2	-0,3
60°	0,7	0,7	0,7	-0,2	-0,3
75°	0,8	0,8	0,8	-0,2	-0,3

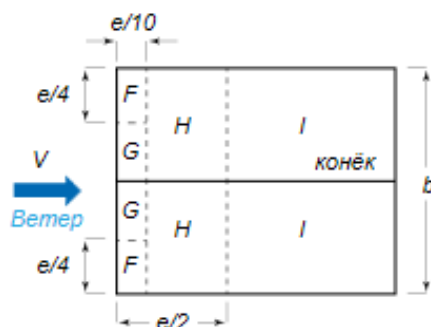
таблица 4

при ветре во фронтон

уклон α	F	G	H	I
0°	-1,8	-1,3	-0,7	-0,5
15°	-1,3	-1,3	-0,6	-0,5
30°	-1,1	-1,4	-0,8	-0,5
45°	-1,1	-1,4	-0,9	-0,5
60°	-1,1	-1,2	-0,8	-0,5
75°	-1,1	-1,2	-0,8	-0,5



e выбирается по наименьшему значению из b или 2h



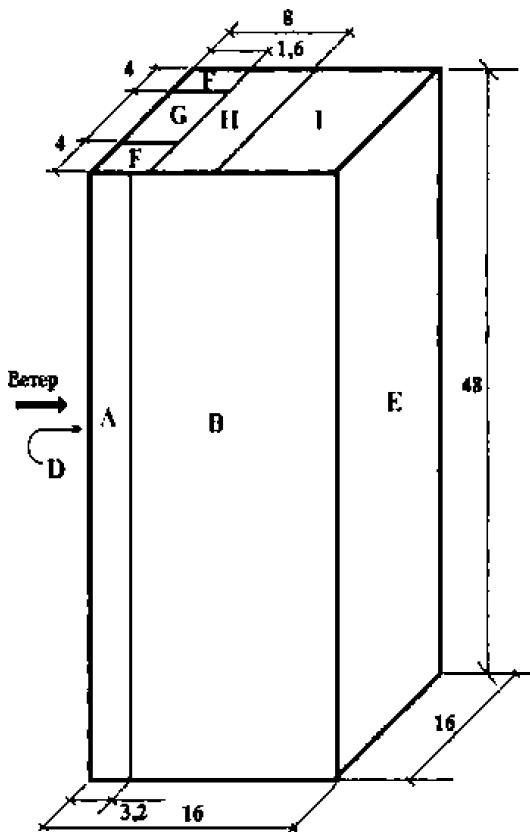


Рисунок - Зонирование поверхности здания по величине аэродинамического коэффициента

Необходимо отметить, что кроме всего прочего Еврокод предусматривает случай приложения ветровой нагрузки по фронту наветренной стены с определенным эксцентриситетом, что дает общее закручивание здания, не учитываемое отечественными нормами. А само наличие такого закручивания было установлено экспериментально, где среди прочих аэродинамических коэффициентов присутствует и коэффициент закручивающего момента Сш.

11.3.2 Пульсационная составляющая ветровой нагрузки

Нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки w_p на эквивалентной высоте z_e следует определять следующим образом:

а) для сооружений (и их конструктивных элементов), у которых первая частота собственных колебаний f_1 , Гц, больше предельного значения собственной частоты f_1 (см. 11.1.10), - по формуле

$$w_p = w_m \zeta(z_e) v, \quad (11.5)$$

где w_m - нормативное значение средней составляющей (рассмотрено выше);

$\zeta(z_e)$ - коэффициент пульсации давления ветра, принимаемый по таблице 11.4 или формуле $\zeta(z_e) = \zeta 10(z_e/10)^{-\alpha}$. для эквивалентной высоты z_e (см. 11.1.5);

v - коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра (см. 11.1.11);

Таблица 11.4

Высота z_e , м	Коэффициент пульсаций давления ветра ζ для типов местности		
	А	В	С
≤ 5	0,85	1,22	1,78
10	0,76	1,06	1,78

20	0,69	0,92	1,50
40	0,62	0,80	1,26
60	0,58	0,74	1,14
80	0,56	0,70	1,06
100	0,54	0,67	1,00
150	0,51	0,62	0,90
200	0,49	0,58	0,84
250	0,47	0,56	0,80
300	0,46	0,54	0,76
350	0,46	0,52	0,73
≥480	0,46	0,50	0,68

б) для всех сооружений (и их конструктивных элементов), у которых $f_1 < f_i < f_2$, где f_2 - вторая собственная частота, по формуле

$$w_p = w_m \xi \zeta(z_e) v, \quad (11.7)$$

ξ - коэффициент динамичности, определяемый по рисунку 11.1 в зависимости от параметра логарифмического декремента колебаний δ (см. 11.1.1) и параметра ε_1 , который определяется по формуле (11.8) для первой собственной частоты f_1 ;

$$\varepsilon_1 = \frac{\sqrt{w_0 k(z_{эк}) \gamma_f}}{940 f_1}. \quad (11.8)$$

Здесь w_0 (Па) - нормативное значение давления ветра (11.1.4);

$k(z_{эк})$ - коэффициент, учитывающий изменение давления ветра для высоты $z_{эк}$ (11.1.6);

γ_f - коэффициент надежности по нагрузке (11.1.12).

Для конструктивных элементов $z_{эк}$ - высота z , на которой они расположены; для зданий и сооружений $z_{эк} = 0,7/h$, где h - высота сооружений;

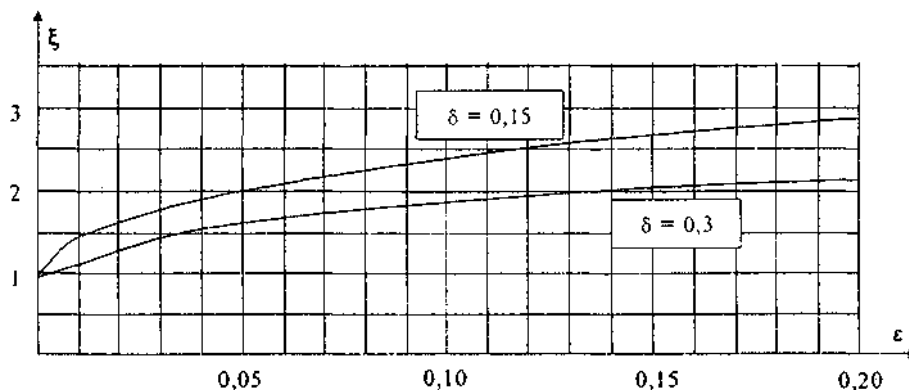


Рисунок 11.1 - Коэффициенты динамичности

в) для сооружений, у которых вторая собственная частота меньше предельной, необходимо произвести динамический расчет с учетом s первых форм собственных колебаний. Число s следует определять из условия

$$f_s < f_i < f_{s+1};$$

г) при расчете зданий допускается учитывать динамическую реакцию по трем нижшим собственным формам колебаний (двум изгибным и одной крутильной или смешанным крутильно-изгибным).

Примечание - При расчете многоэтажных зданий высотой до 40 м и одноэтажных производственных зданий высотой до 36 м при отношении высоты к пролету менее 1,5, размещаемых в местностях типа А и В (см. 11.1.6), пульсационную составляющую ветровой нагрузки допускается определять по формуле (11.5).

11.1.9 Усилия и перемещения при учете динамической реакции по s собственным формам определяются по формуле

$$X^2 = \sum X_s^2, \quad (11.9)$$

где X - суммарные усилия или перемещения;

X_s - усилия или перемещения по s -й форме колебаний.

11.1.10 Предельное значение частоты собственных колебаний f_i , Гц, следует определять по таблице 11.5.

Таблица 11.5

Ветровые районы (принимаются по карте 3 приложения Ж)	f_i , Гц	
	$\delta = 0,3$	$\delta = 0,15$
Ia	0,85	2,6
I	0,95	2,9
II	1,1	3,4
III	1,2	3,8
IV	1,4	4,3
V	1,6	5,0
VI	1,7	5,6
VII	1,9	5,9

Значение логарифмического декремента колебаний δ следует принимать:

а) для железобетонных и каменных сооружений, а также для зданий со стальным каркасом при наличии ограждающих конструкций $\delta = 0,3$;

б) для стальных сооружений футерованных дымовых труб, аппаратов колонного типа, в том числе на железобетонных постаментов $\delta = 0,15$.

11.1.11 Коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления v следует определять для расчетной поверхности коэффициента сооружения или отдельной конструкции, для которой учитывается корреляция пульсаций.

Расчетная поверхность включает в себя те части наветренных и подветренных поверхностей, боковых стен, кровли и подобных конструкций, с которых давление ветра передается на рассчитываемый элемент сооружения.

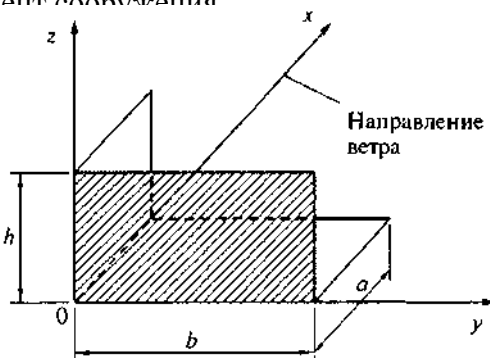


Рисунок 11.2 - Основная система координат при определении корреляции v

Если расчетная поверхность близка к прямоугольнику, ориентированному так, что его стороны параллельны основным осям (рисунок 11.2), то коэффициент v следует определять по таблице 11.6 в зависимости от параметров ρ и χ , принимаемых по таблице 11.7.

Таблица 11.6

ρ , м	Коэффициент v при χ , м, равном
------------	--

	5	10	20	40	80	160	350
0,1	0,95	0,92	0,88	0,83	0,76	0,67	0,56
5	0,89	0,87	0,84	0,80	0,73	0,65	0,54
10	0,85	0,84	0,81	0,77	0,71	0,64	0,53
20	0,80	0,78	0,76	0,73	0,68	0,61	0,51
40	0,72	0,72	0,70	0,67	0,63	0,57	0,48
80	0,63	0,63	0,61	0,59	0,56	0,51	0,44
160	0,53	0,53	0,52	0,50	0,47	0,44	0,38

При расчете сооружения в целом размеры расчетной поверхности следует определять с учетом указаний Д.1 приложения Д, при этом для решетчатых сооружений в качестве расчетной поверхности необходимо принимать размеры расчетной поверхности по его внешнему контуру.

Таблица 11.7

Основная координатная плоскость, параллельно которой расположена расчетная поверхность	ρ	χ
zoy	b	h
zox	$0,4a$	h
xoy	b	a

11.3.3 Пиковая ветровая нагрузка

Для элементов ограждения и узлов их крепления необходимо учитывать пиковые положительные w_+ и отрицательные w_- воздействия ветровой нагрузки, нормативные значения которых определяются по формуле

$$w_{+(-)} = w_0 k(z_e) [1 + \zeta(z_e)] c_{p,+(-)} v_{+(-)}, \quad (1.10)$$

где w_0 - расчетное значение давления ветра (11.1.4);

z_e - эквивалентная высота (11.1.5);

$k(z_e)$ и $\zeta(z_e)$ - коэффициенты, учитывающие, соответственно, изменение давления и пульсаций давления ветра на высоте z_e (11.1.6 и 11.1.8);

$c_{p,+(-)}$ - пиковые значения аэродинамических коэффициентов положительного давления (+) или отсоса (-);

$v_{+(-)}$ - коэффициенты корреляции ветровой нагрузки, соответствующие положительному давлению (+) и отсосу (-); значения этих коэффициентов приведены в таблице 11.8 в зависимости от площади ограждения A , с которой собирается ветровая нагрузка.

Таблица 11.8

$A, \text{ м}$	< 2	5	10	> 20
v_+	1,0	0,9	0,8	0,75
v_-	1,0	0,85	0,75	0,65

Аэродинамические коэффициенты $c_{p,+}$ и $c_{p,-}$, как правило, определяются на основе результатов модельных испытаний сооружений в аэродинамических трубах. Для отдельно стоящих прямоугольных в плане зданий значения этих коэффициентов приведены на схеме Д.1.17 приложения Д.1.

Примечание - При определении пиковой ветровой нагрузки (формула (11.10)) принято, что конструктивные элементы ограждения и узлы их крепления к зданию являются достаточно жесткими и в них не возникает заметных динамических усилий и перемещений. В случае если собственные частоты системы «элементы ограждения - их несущие конструкции - элементы их крепления» менее 1,5 Гц, расчетные значения пиковой ветровой нагрузки

должны быть уточнены на основе результатов динамического расчета указанной системы конструктивных элементов.

11.3.4 Резонансное вихревое возбуждение

11.3.1 Для зданий и сооружений, удовлетворяющих условию $h/d > 10$, необходимо проводить их поверочный расчет на резонансное вихревое возбуждение; здесь h - высота сооружения, d - его характерный поперечный размер в направлении, перпендикулярном средней скорости ветра.

11.3.2 Критические скорости ветра $V_{cr,i}$, при которых происходит резонансное вихревое возбуждение по i -й собственной форме колебаний, определяются по формуле

$$V_{cr,i} = f_i d/St, \text{ м/с}, \quad (11.11)$$

где f_i , Гц, - собственная частота колебаний по i -й изгибной собственной форме;

d , м, - поперечный размер сооружения;

St - число Струхала поперечного сечения, определяемое экспериментально или по справочным данным; для круглых поперечных сечений $St = 0,2$; для сечений с острыми кромками (в т.ч. и прямоугольных) - $St = 0,11$.

11.3.3 Резонансное вихревое возбуждение не возникает в том случае, если

$$V_{cr,l} > V_{max}(z_{эк}), \quad (11.12)$$

где $V_{max}(z_{эк})$ - максимальная скорость ветра на уровне $z_{эк}$, определяемая по формуле

$$V_{max}(z_{эк}) = 1,3\sqrt{w_0 k(z_e)}, \quad (11.13)$$

где w_0 , Па, и $k(z_e)$ определяются в соответствии с указаниями 11.1.4 и 11.1.6.

Для зданий и башенных сооружений с плавно изменяющейся формой поперечного сечения, а также труб и мачт без оттяжек $z_{эк} = 0,8h$.

11.3.4 Ветровые нагрузки, возникающие при резонансном вихревом возбуждении, допускается определять в соответствии с указаниями Д.2 приложения Д.

11.3.5 Динамическая комфортность

При оценке комфортности пребывания людей в зданиях (динамическая комфортность) расчетные значения ветровой нагрузки w_c принимаются равными

$$w_c = 0,7w_p, \quad (11.14)$$

где w_p - нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки (11.1.8).

При этом максимальное ускорение этажа здания не должно превышать величины

$$a_{c,max} = 0,08 \text{ м/с}^2. \quad (11.15)$$

11.4 Применение закона Вейбулла для исследования ветровых нагрузок

В метеорологии для моделирования скорости ветра v используется распределение Вейбулла:

$$P(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{\alpha}\right)^\beta\right]$$

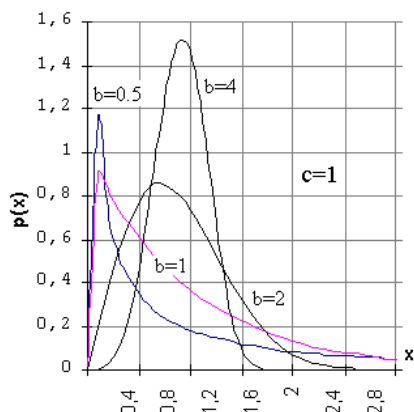
где $P(v)$ - вероятность того, что скорость ветра не превысит значения v ;

α и β - коэффициенты, определяемые для каждой метеостанции и зависящие от ветрового режима данной местности. (Для района Москвы, например, в одной из работ

приведены значения $\alpha = 4,42$ и $\beta = 0,15$). В нормах *Москва – 4-ый ветровой район по скорости ветра в зимний период, 1-ой по давлению ветра*

Распределение ограничено со стороны одного из экстремальных значений (минимального или максимального) точкой X_0 и неограничено в противоположном направлении.

Плотность распределения Вейбулла



Математическое ожидание и дисперсия

$$\mu = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$$

$$\sigma^2 = \beta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)\right)^2 \right]$$

где $\Gamma(r)$ – гамма-функция:

$$\Gamma(r) = \int_0^{\infty} x^{r-1} e^{-x} dx, \quad r > 0$$

В MathCAD функция $\Gamma(z)$ возвращает гамма-функцию Эйлера от z (To type Γ , press G [Ctrl] G .)

$$\int_0^{\infty} t^{z-1} \cdot e^{-t} dt$$

Аналогично снеговой нагрузке, используем понятие периода повторяемости T_{v0} как средний промежуток времени между превышениями скорости ветра уровень v_0 . Вероятность этого превышения равна

$$a = P(v > v_0) = 1 - P(v) = \exp\left[-\left(\frac{v}{\alpha}\right)^\beta\right]$$

Примем в качестве условной зоны корреляции скорости ветра произведение $\tau = a T_{v0}$, откуда выражаем период повторяемости $T_{v0} = \tau / a = \tau \cdot \exp((v/\alpha)^\beta)$

Из этой формулы можно получить скорость v_0 , соответствующую данному периоду повторяемости T_{v0} , проведя следующие преобразования

$$\ln\left(\frac{T_{v0}}{\tau}\right) = \left(\frac{v}{\alpha}\right)^\beta \quad \text{Откуда искомая скорость равна } V_0 = \sqrt[\beta]{\ln \frac{T_{v0}}{\tau}} \cdot \alpha$$

Зона корреляции для скорости ветра в первом приближении $\tau=1$ сутки

$$T_{v0}=18250=365 \cdot 50, \text{ где } 50 - \text{ период повторяемости}$$

Учитывая, что ветровое давление w_0 связано со скоростью ветра зависимостью

$$w_0 = 0,43v_{50}^2, \quad (\text{Для горных и малоизученных } w_0 = 0,61v_{50}^2, \text{)}, \text{ можно перейти к формуле, связывающей нормативное ветровое давление с периодом повторяемости } T_{v0} :$$

Нормативное ветровое давление вычисляется, исходя из периода повторяемости **50 лет**. Коэффициент надежности для ветровой нагрузки $\gamma_f = 1,4$. Зона корреляции для скорости ветра в первом приближении может быть принята равной одним суткам: $\tau = 1$ сутки, отсюда могут быть вычислены скорость и давление

Для описания распределения годовых или месячных **максимумов скорости ветра** используется, как и для максимумов снеговой нагрузки, двойное экспоненциальное распределение Гумбеля

$$P(v_{\max}) = \exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha - v_{\max}}{\beta}\right)\right]$$

В таблице приведены статистические характеристики ветрового давления для семи ветровых районов, вычисленные с использованием двойного экспоненциального распределения. Из этой таблицы хорошо видно, что нормативное значение ветрового давления, установленное в нормах, весьма близко к математическому ожиданию. Таким образом, в вероятностных расчетах, где используются не нормативные или расчетные значения нагрузок, а математические ожидания и коэффициенты вариации, для ветровой нагрузки можно использовать приведенные в нормах значения w_0 для соответствующего ветрового района.

Таблица Статистические характеристики ветрового давления

Ветровой район	Нормативное ветровое давление	Математическое ожидание скоростного напора, Па	Среднее квадратичное отклонение, Па	Коэффициент вариации скоростного напора
I	230	200	88,0	0,44
II	300	270	99,9	0,37
III	380	360	115,2	0,32
IV	480	480	148,8	0,31
V	600	600	168,0	0,28
VI	730	700	189,0	0,27
VII	850	850	204,0	0,24

12 ГОЛОЛЕДНЫЕ НАГРУЗКИ

12.1. Образование и изучение гололедных отложений

Гололедные отложения на конструкциях различного назначения образуются в результате:

- * осадения и замерзания переохлажденных капель воды при наличии тумана, мороси, дождя;
- * замерзания мокрого снега;
- * сублимации водяного пара

В зависимости от процессов образования отложений воды разработана классификация наземного обледенения.

Группа	Процесс образования наземного обледенения	Подгруппа	Условия протекания процесса	Вид обледенения
1	Сублимация водяного пара - водяной пар переходит непосредственно в лед, минуя стадию воды	А	Возгонка пара в лед	Иней, кристаллическая изморозь
		Б	То же, при тумане	Кристаллическая изморозь
2	Кристаллизация переохлажденной воды - за счет осадения и замерзания переохлажденных капель воды	А	Замерзание капель тумана	Зернистая изморозь
		Б	Замерзание капель мороси и дождя	Гололед
3	Кристаллизация непереохлажденной воды - при осадении и замерзании непереохлажденной воды и мокрого снега	А	Замерзание дождевой или талой воды	Замерзшая вода
		Б	Замерзание мокрого снега	Замерзшее отложение снега (наледь)

Как видно из таблицы, вид гололедных отложений зависит от размеров водяных капель и скорости их замерзания при соприкосновении с конструкциями

Поскольку спектр размеров капель воды в атмосфере весьма широк, на конструкциях могут возникать сложные гололедообразования, состоящие из нескольких видов или наслоений, которые называются смешанными. Средняя плотность такой смеси может колебаться в широких пределах, поскольку зависит от того, какой вид льда в ней преобладает. На образование гололедных отложений на конструкциях, кроме перечисленных метеорологических условий (температура, влажность, осадки), влияет еще целый ряд факторов:

- высотное положение элементов;
 - характерные размеры поперечного сечения элементов: диаметр, ширина, высота;
 - скорость и направление ветра;
 - характер подстилающей поверхности: степь, водоем, лес, населенный пункт и т.д.;
- В частности, связь скорости ветра и повторяемости различных видов гололедных отложений иллюстрируется графиком

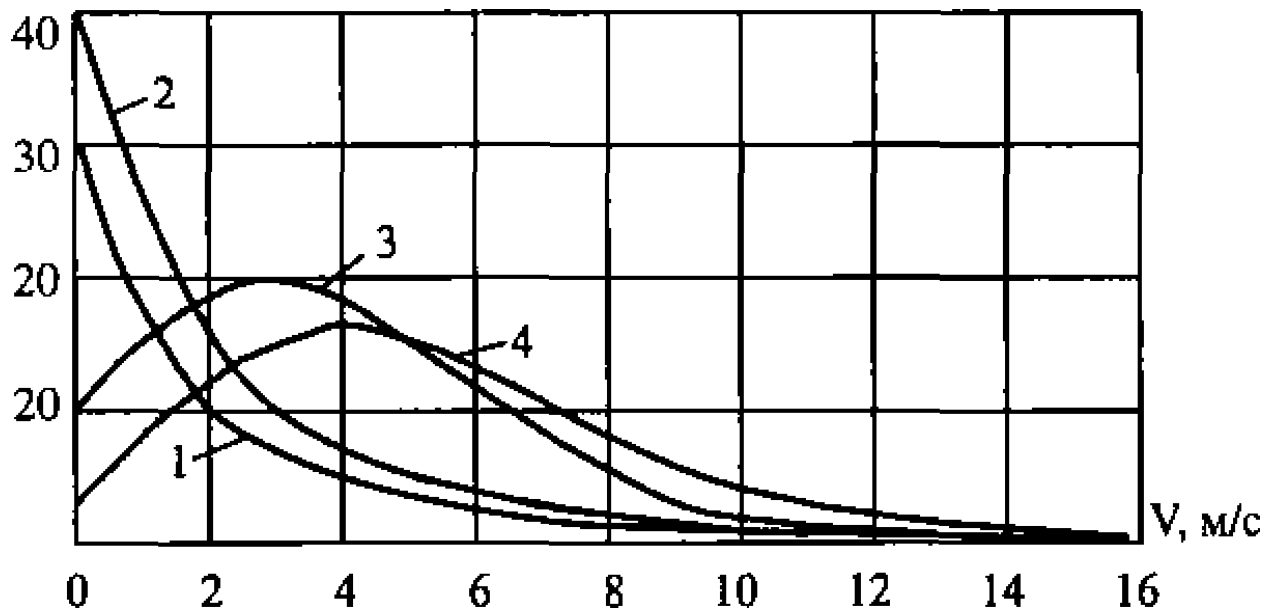


Рис. 12.1. Повторяемость образования различных гололедно- изморозевых отложений: 1 - иней, 2 - кристаллическая изморозь, 3 - зернистая изморозь, 4 – гололед

Аварии конструкций из-за перегрузки гололедом

Аварии конструкций могут возникнуть из-за перегрузки гололедом. Особенно большое влияние гололедные нагрузки оказывают на надежность и аварийность конструкций воздушных линий (ВЛ) связи и электропередачи.



Методы измерения гололеда

А. Измерения с помощью гололедного станка.

На метеорологических станциях большая часть инструментальных наблюдений за гололедными отложениями проводится этим простейшим методом. Основной частью гололедного станка являются жестко закрепленные (постоянные) и съемные (сменные) стержни (провода) диаметром 5 мм длиной 90 см, прикрепленные к трем стойкам на высоте 2 м от уровня земли. Два провода ориентированы в меридиональном направлении («север-юг»), два провода - в широтном направлении («запад-восток»). Съем параметров осуществляется четыре раза в сутки, а при образовании гололеда - через 2 часа. В процессе наблюдений на постоянном проводе измеряют большой диаметр (по линии наибольшей величины отложения) и малый диаметр (в направлении, перпендикулярном большому диаметру). Вес отложения измеряется с помощью сменного провода.

Недостатки этой методики гололедных измерений:

- невысокая точность измерений при визуальном определении мест максимальных размеров отложения;
- заметные погрешности, которые могут возникать при переходе от нагрузок на провод станка к нагрузкам на реальные линии из-за разности высот;
- несоответствие расположения метеостанций местам расположения реальных линий электропередачи, в то время как существующая методика переноса гололедных нагрузок с учетом микроклиматических особенностей местности основана на значительных допущениях.

Альтернативы описанным методам и их аналогам в настоящее время еще нет, и разрабатываемые автоматические измерители массы гололеда поверяются по показаниям прямых ручных измерений массы гололеда на проводах или их имитаторах.

Б. Измерения на гололедных постах.

В связи с особой важностью объективной оценки гололедных нагрузок на конструкции ВЛ электропередачи в середине 70-х годов прошлого века были введены в эксплуатацию гололедные посты на электрических подстанциях. На этих постах используются провода большого диаметра (10 и 24 мм), расположенные на стандартной высоте 10 м. Основное достоинство гололедных постов заключается в том, что они размещены непосредственно в местах максимальной концентрации воздушных линий. Недостатками постов являются дискретность проведения измерений и невысокая точность замеров.

В. Инструментальные измерения гололеда.

В различных отраслях промышленности, в том числе газовой, нефтяной, химической и др., разработаны и используются сигнализаторы гололедно-изморозевых отложений, назначение которых - выработка сигнала тревоги при начале гололедообразования. В качестве примеров можно привести акустические сигнализаторы, в том числе отечественный СО-1 и швейцарский EW-МО, принцип действия которых основан на увеличении частоты собственных колебаний мембраны из-за увеличения жесткости, вызываемого гололедом. Разработаны также оптические сигнализаторы начала гололедообразования.

Для проведения измерений скорости ветра при гололеде необходимо применять анеометры с подогревом

12.2 Нормирование гололедных нагрузок в СП 20.13330.2011

12.1 Гололедные нагрузки необходимо учитывать для

- воздушных линий электропередачи и связи,
- контактных сетей электрифицированного транспорта,

- антенно-мачтовых устройств,
- шпилей,
- вентилируемых фасадов зданий,
- для решетчатых ограждений балконов,
- стен и покрытий высотных зданий, расположенных на высоте 150 м и более,
- и подобных сооружений.

12.2 Нормативное значение линейной гололедной нагрузки для элементов кругового сечения диаметром до 70 мм включительно (проводов, тросов, оттяжек, мачт, вант и др.) i , Н/м, следует определять по формуле

$$i = \pi b k \mu_1 (d + b k \mu_1) \rho g 10^{-3}. \quad (12.1)$$

Нормативное значение поверхностной гололедной нагрузки i' , Па, для вентилируемых фасадов зданий и других элементов следует определять по формуле

$$i' = b k \mu_2 \rho g. \quad (12.2)$$

В формулах:

b - толщина стенки гололеда, мм (превышаемая один раз в 5 лет), на элементах кругового сечения диаметром 10 мм, расположенных на высоте 10 м над поверхностью земли, принимаемая по таблице 12.1, а на высоте 200 м и более - по таблице 12.2. Для других периодов повторяемости или при наличии метеорологических данных для района строительства толщину стенки гололеда следует принимать по специальным техническим условиям, утвержденным в установленном порядке;

k - коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда по высоте и принимаемый по таблице [12.3](#);

d , мм, - диаметр провода, троса;

μ_1 - коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда в зависимости от диаметра элементов кругового сечения и определяемый по таблице 12.4;

μ_2 - коэффициент, учитывающий отношение площади поверхности элемента, подверженной обледенению, к полной площади поверхности элемента и принимаемый равным 0,6;

ρ - плотность льда, принимаемая равной 0,9 г/см³;

g , м/с², - ускорение свободного падения.

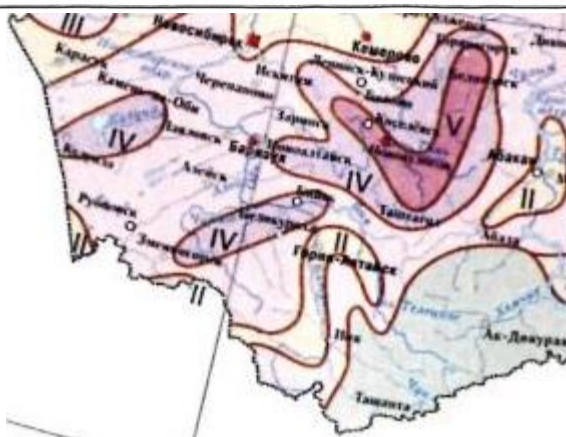
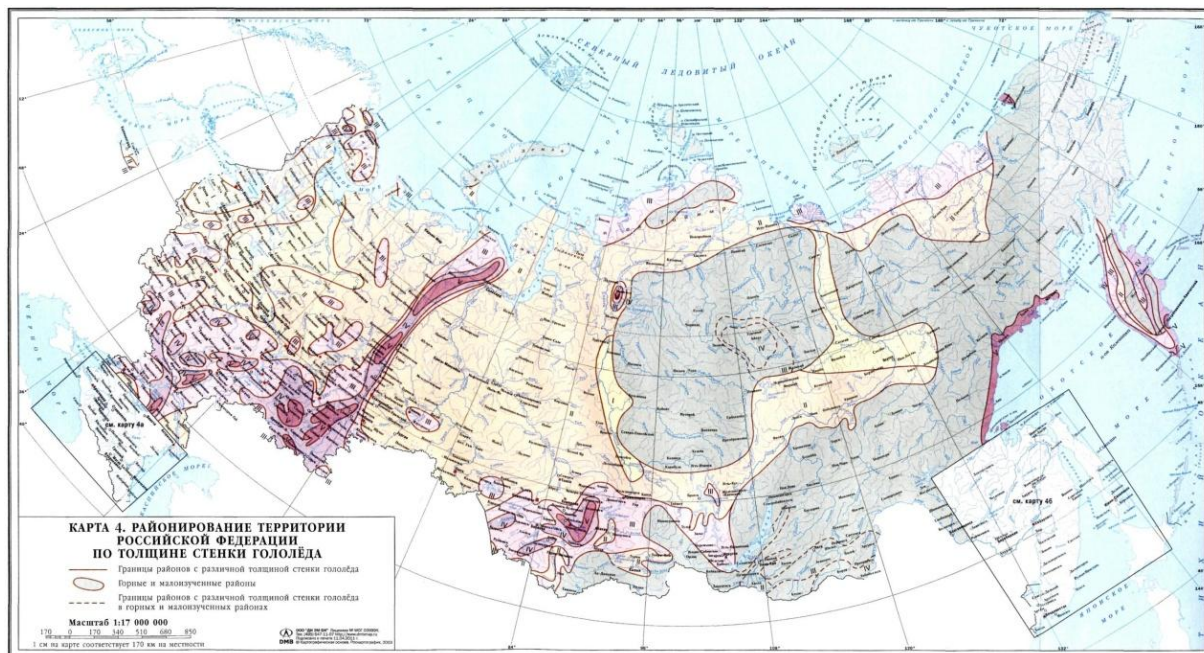


Таблица 12.1

Гололедные районы (принимаются по карте 4 приложения Ж)	I	II	III	IV	V
Толщина стенки гололеда b , мм	Не менее 3	5	10	15	Не менее 20

Таблица 12.2

Высота над поверхностью земли, м	Толщина стенки гололеда b , мм, для разных районов			
	I района гололедности азиатской части	V района гололедности и горных местностей	северной части европейской территории	остальных
200	15	Принимается на основании специальных обследований	Принимается по карте 4, з приложения Ж	35
300	20	То же	То же, по карте 4, d	45
400	25	»	» по карте 4, e	60

Таблица 12.3

Высота над поверхностью земли, м	5	10	20	30	50	70	100
Коэффициент k	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0

Таблица 12.4

Диаметр провода, троса или каната, мм	5	10	20	30	50	70
Коэффициент μ_1	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6

Примечания (к таблицам 12.1- 12.4)

1 В V районе, горных и малоизученных районах, обозначенных на карте 4 [приложения Ж](#), а также в сильнопересеченных местностях (на вершинах гор и холмов, на перевалах, на высоких насыпях, в закрытых горных долинах, котловинах, глубоких выемках и т.п.) толщину стенки гололеда необходимо определять на основании данных специальных обследований и наблюдений.

2 Промежуточные значения величин следует определять линейной интерполяцией.

3 Толщину стенки гололеда на подвешенных горизонтальных элементах кругового сечения (тросах, проводах, канатах) допускается принимать на высоте расположения их приведенного центра тяжести.

Коэффициент надежности по нагрузке для гололедной нагрузки следует принимать равным 1,3, за исключением случаев, оговоренных в других нормативных документах.

12.3 Нормативное значение ветровой нагрузки на покрытые гололедом элементы следует принимать равным 25 % нагрузки w , определяемой согласно 11.1

Примечания

1 В отдельных районах, где наблюдаются сочетания значительных скоростей ветра с большими размерами гололедно-изморозевых отложений, толщину стенки гололеда и его плотность, а также давление ветра следует принимать в соответствии с фактическими данными.

2 При определении ветровых нагрузок на элементы сооружений, расположенных на высоте более 100 м над поверхностью земли, диаметр обледенелых проводов и тросов, установленный с учетом толщины стенки гололеда, приведенной в таблице 12.2, необходимо умножать на коэффициент, равный 1,5.

Для определения гололедной нагрузки на горизонтальные элементы круговой цилиндрической формы диаметром до 70 мм толщину стенки гололеда, приведенную в таблице 12.2, следует снижать на 10 %.

12.4 Температуру воздуха при гололеде независимо от высоты сооружений следует принимать в горных районах с отметкой: более 2000 м - минус 15 °С, от 1000 до 2000 м - минус 10 °С; для остальной территории для сооружений высотой до 100 м - минус 5 °С, более 100 м - минус 10 °С.

Примечание - В районах, где при гололеде наблюдается температура ниже минус 15 °С, ее следует принимать по фактическим данным.

Кроме того, в V районе, горных и малоизученных районах СНГ, а также в сильнопересеченных местностях (на вершинах гор и холмов, на перевалах, на высоких насыпях, в

закрытых горных долинах, котловинах, глубоких выемках и т.п.) толщину стенки гололеда необходимо определять на основании данных специальных обследований и наблюдений.

При исследованиях было выявлено, что фактическая скорость ветра при максимальном гололеде (также при периоде повторяемости 10 лет) составляет 0,12-0,8 максимальной скорости (при норме - 0,5 максимальной скорости). Вследствие этого, а также в результате возможного превышения наветренной площади обледеневшего провода ветровые нагрузки на провод при гололеде могут в 1,5...2,0 превосходить нормативные значения. Анализ сочетаний гололедных и ветровых нагрузок не выявил корреляционной связи между скоростью ветра и весом, диаметром и плотностью отложений.

В 2016 г появился **ГОСТ Р ИСО 12494-2016 Основы проектирования строительных конструкций. Определение гололедных нагрузок.**

Дата введения 01 мая 2017. Стандарт идентичен международному стандарту ИСО 12494:2001*, "Обледенение строительных конструкций в результате атмосферного воздействия" (ISO 12494:2001

Стандарт предназначен для применения при определении массы гололеда и ветровой нагрузки на обледеневшую конструкцию для следующих типов конструкций:

- мачты;
- башни;
- антенны и антенные сооружения;
- тросы, оттяжки, ванты и т.д.;
- канатные дороги (подвесные дороги);
- конструкции горнолыжных подъемников;
- здания или их части, которые могут подвергнуться обледенению;
- вышки для специальных типов сооружений, включая линии электропередачи, ветряные турбины и т.д.

Примечание - Выше упомянуты некоторые типы конструкций, однако нужно рассматривать и другие типы. Проектировщики должны думать о том, какие типы конструкций чувствительны к непредвиденному обледенению, и поступать соответственно.

Во многих случаях только некоторые части сооружений следует рассчитывать на гололедные нагрузки, так как они более уязвимы к непредвиденному обледенению, чем сооружение в целом.

Основные воздействия от обледенения - это повышенные вертикальные нагрузки на обледеневшую конструкцию и повышенное лобовое сопротивление, вызываемое увеличением наветренной площади. Последнее может привести к большим ветровым нагрузкам, чем при отсутствии обледенения

Различные типы конструкций проявляют большую или меньшую чувствительность к обледенению. Несколько таких примеров приведено ниже:

*а) Растянутые стальные тросы, канаты, оттяжки и т.д. обычно очень чувствительны к обледенению; соответственно, оно может привести к значительному повышению **растягивающих усилий** в этих элементах.*

*б) Тонкие решетчатые конструкции, в частности мачты с оттяжками, чувствительны к возрастанию **осевых сжимающих усилий** с ростом обледенения конструкции.*

*с) Антенны и антенные конструкции легко подвергаются перегрузкам при возрастании гололеда, если они не были предусмотрены. В частности, небольшие **крепежные детали не выдерживают** при добавлении повышенной нагрузки к другим воздействиям, так как лед способен с легкостью удвоить нормальную нагрузку.*

d) "Провисание льда" на несущих элементах может оказаться разрушительным. Ненесущие элементы, такие как антенны и тросы, могут подвергаться воздействию не предусмотренных гололедных нагрузок, так как лед провисает на элементах, покрывает их или давит на них. При этом такое воздействие может оказаться значительно более высоким, чем обычная нагрузка от их обледенения.

e) Нагрузка от нарастающего гололеда может легко привести к деформации или повреждению элементов ограждающих конструкций (обшивки и т.д.) и вызвать их разрушение, если лед не сбросить прежде, чем усилия значительно возрастут

Для того чтобы выразить ожидаемое значение толщины стенки гололеда, образовавшегося на определенной площадке, вводится понятие "ледовый класс" (IC). Ледовый класс - параметр, который должен использоваться проектировщиками для определения предполагаемой степени обледенения на данной площадке.

Ледовые классы определяются характеристическим значением толщины стенки гололеда на контрольном коллекторе с 50-летним периодом повторяемости. Данный контрольный коллектор представляет собой цилиндр диаметром 30 мм и длиной не менее 0,5 м, расположенный на высоте 10 м над поверхностью земли и медленно поворачивающийся вокруг своей оси.

Ледовые классы определяют и для гололеда, и для изморози, так как их характеристики отличаются друг от друга. Класс ICG предназначен для гололедных отложений, а ICR - для изморозевых отложений (мокрый снег рассматривают в данном случае как изморозь)

Ледовый класс (IC)	Толщина стенки гололеда , мм	Масса гололеда , кг/м			
		Диаметр цилиндра, мм			
		10	30	100	300
G1	10	0,6	1,1	3,1	8,8
G2	20	1,7	2,8	6,8	18,1
G3	30	3,4	5,1	11,0	28,0
G4	40	5,7	7,9	15,8	38,5
G5	50	8,5	11,3	21,2	49,5
G6	Следует использовать в случае экстремального обледенения.				

Ледовый класс (IC)	Масса льда , кг/м	Диаметр изморози, мм, для объектов диаметром 30 мм
		Плотность изморози, кг/м

		300	500	700	900
R1	0,5	55	47	43	40
R2	0,9	69	56	50	47
R3	1,6	88	71	62	56
R4	2,8	113	90	77	70
R5	5,0	149	117	100	89
R6	8,9	197	154	131	116
R7	16,0	262	204	173	153
R8	28,0	346	269	228	201
R9	50,0	462	358	303	268
R10	Следует использовать в случае экстремального обледенения.				

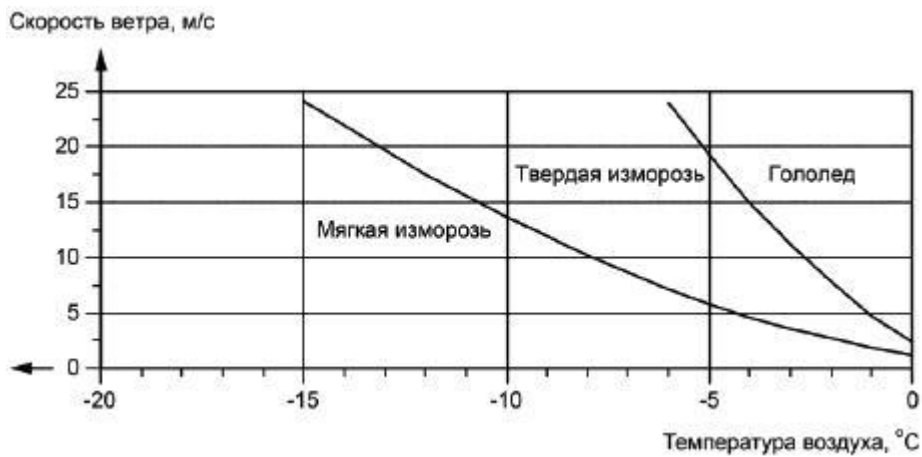


Рисунок 1 - Тип обледенения как функция скорости ветра и температуры воздуха

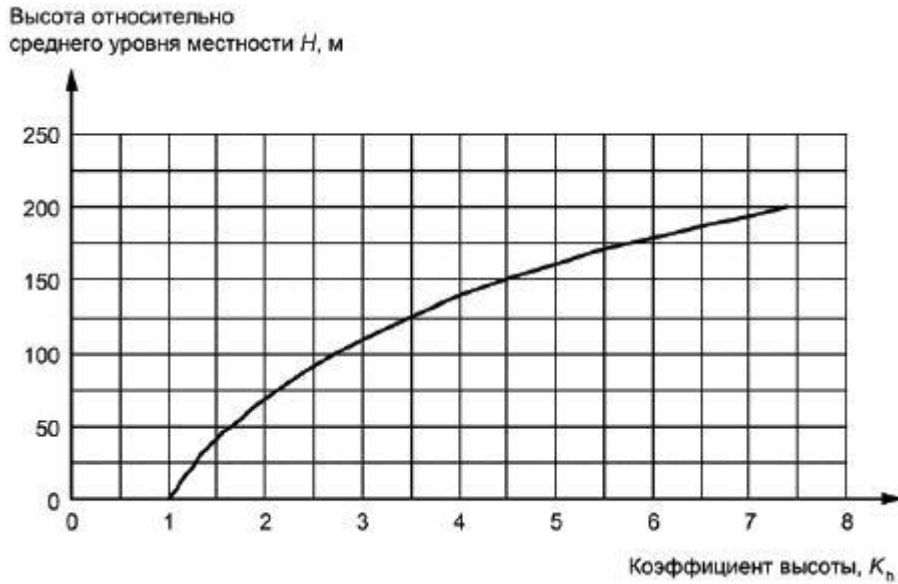


Рисунок 2 - Типичное изменение массы гололеда с высотой над уровнем земли

Примечание - Высотный коэффициент $K_h = e^{0,01H}$.

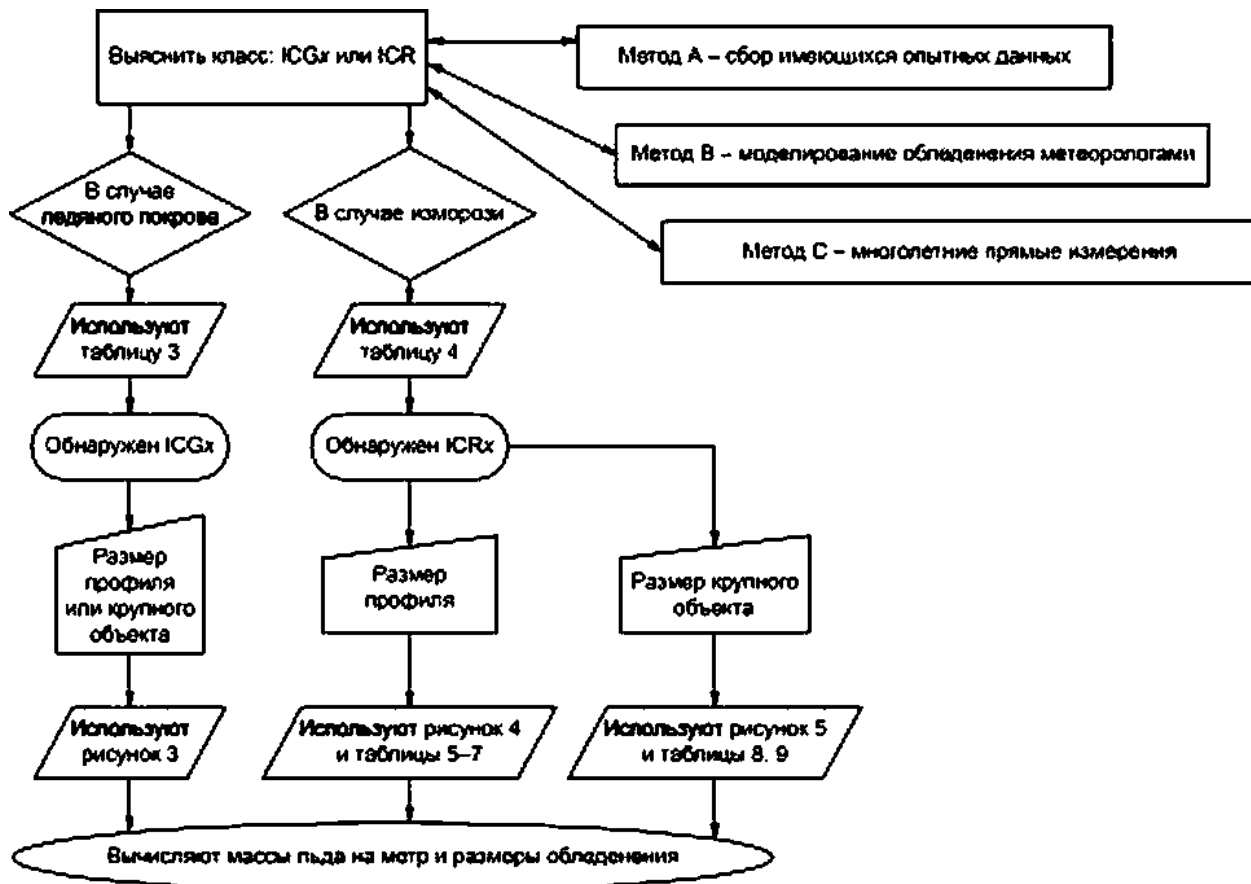
Приложение С Теоретическое моделирование гололеда

Приложение А уравнения в стандарте

Гололедные нагрузки, рассматриваемые здесь, являются характеристическими нагрузками и определяются как нагрузки с периодом повторяемости 50 лет или вероятностью ежегодного превышения 0,02. рассмотрены два сочетания нагрузок от ветра и гололеда.

При первом сочетании нагрузок воздействие ветра с низкой вероятностью превышения обычно сочетается с воздействием от обледенения с высокой вероятностью превышения.

При втором сочетании нагрузок высокую вероятность превышения имеет ветровая нагрузка, а низкую вероятность превышения — гололедная нагрузка.



Последние 40 - 45 лет на метеорологических станциях СССР-СНГ систематически определяется масса гололеда на погонный метр гололедного станка, которая затем пересчитывается на нормативную толщину стенки гололеда, в частности на Останкинской телевизионной башне в Москве и метеорологической мачте в Обнинске.

В описании максимальных значений гололедных нагрузок, как и других атмосферных воздействий, довольно широкое распространение получило экстремальное распределение

Гумбеля. Интегральная функция распределения: $P(x) = \exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha - x}{\beta}\right)\right]$

Распределение Гумбеля используется при экстраполяции экстремумов нагрузок (годовых, месячных и др.), в частности, гололедных нагрузок, на более длительный срок. Используя период повторяемости T , можно получить значение расчётной нагрузки S для любого периода однократного превышения $s = \alpha - \beta \ln[-\ln(1 - T^{-1})]$. Это важно, т.к. периоды наблюдений на метеостанциях составляют 35-40 лет, а расчетные значения должны определяться с повторяемостью 50-500 лет.

Пример использования шкалы коэффициентов надежности по гололедной и ветровой нагрузке для европейской части России.

Вид нагрузки	Период повторяемости, лет		
	50	150	500

	$\gamma f 50$	a	V	$\gamma f 150$	a	V	$\gamma f 500$	a	V
Гололедная	1,47	0,052	0,035	1,77	0,084	0,047	2,08	0,117	0,056
Ветровая при гололеде	2,19	0,228	0,104	3,24	0,506	0,156	4,65	0,774	0,166

Примечание. Коэффициенты надежности вводятся к нормативной ветровой нагрузке, определенной для периода повторяемости 10 лет и скорости ветра с 2-минутным осреднением.

Как видно из таблицы, достоверность коэффициентов не вызывает сомнения, поскольку коэффициенты вариации этой нагрузки весьма невелики (0,047... 0,056). Статистические расчеты показали, что коэффициенты надежности по ветровой нагрузке при гололеде не зависят от величины нагрузки, имеют относительно большие коэффициенты вариации (0,104...0,166) и значительно (в 1,5...2,0 раза) превышают соответствующие коэффициенты надежности по максимальной ветровой нагрузке. Это связано с тем, что ветровую нагрузку при гололеде определяет не только скорость ветра, но и аэродинамическое сопротивление обледеневшего провода и его наветренная площадь.

Основная вероятностная модель, используемая для описания, прогнозирования и нормирования гололедных нагрузок, - это модель годовых максимумов гололедно-изморозевых отложений на гололедном станке. Многолетние исследования показали, что интегральная кривая распределения годовых максимумов массы гололеда (или толщины его стенки) также хорошо описывается распределением Вейбулла,

$$P(x) = \exp \left[- \left(\frac{x}{\alpha} \right)^\beta \right] - \text{вероятность что масса гололеда или толщина его стенки не пре-}$$

высит величину x . Период повторения нагрузки вычисляется как $T = \frac{1}{1 - P(x)}$.

Для определения предельного расчетного значения толщины стенки гололеда $b(T_{ef})$, используемого для расчета конструкций со сроком службы T_{ef} , рекомендуется следующая формула

$$b(T_{ef}) = \left[\frac{\ln(4.5 \cdot n \cdot T_{ef})}{\alpha} \right]^{-\frac{1}{\beta}}$$

где α, β - параметры распределения Вейбулла, определяемые по оценкам математического ожидания и стандарта толщины стенки гололеда;

n - среднее число случаев (частота) гололеда в течение года.

Для $T_{ef}=40-120$ лет обеспеченность расчетного значения $P=0.8$