

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

Б.К. Никитин

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО
И ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ И ПРОВОДНЫХ
СИСТЕМ СВЯЗИ**

**ЧАСТЬ 1. Проектирование, строительство и
техническая эксплуатация**

ПРАКТИКУМ

СПб ГУТ)))

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2019**

Теория расчетов при проектировании оптического кабеля и ВОЛС. К программе «Расчет самонесущего оптического кабеля «Инкаб».

1. Расчет характеристик самонесущего оптического кабеля.

1.1. Начальный модуль упругости.

При растяжении кабеля необходимо учитывать модуль упругости кабеля, $E_{каб}$. Оптический кабель состоит из различных материалов, при этом определяющее значение на модуль упругости целого кабеля оказывают центральный силовой элемент и упрочняющие нити. Для расчета модуля упругости кабеля, необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$E_{каб} = \frac{\sum_{i=1}^m E_i S_i}{S_{каб}}$$

где E_i и S_i – модуль и площадь i -го несущего элемента кабеля.

Понятно, что модуль упругости кабеля также зависит от числа и вида силовых элементов и определяется изготовителем кабеля.

Для самонесущего оптического кабеля

1.2. Сечение кабеля.

Расчет производится по следующей формуле:

$$S_{каб} = \frac{\pi D_{каб}^2}{4}$$

где $D_{каб}$ – внешний диаметр кабеля.

Необходимо учесть, что модули упругости приведены к сечению всего кабеля в целом. Соответственно приводится и расчет площади всего кабеля. В этом случае расчет площади твердых элементов кабеля не нужен.

1.3. Расчет максимально допустимой растягивающей нагрузки.

При расчете рассматриваются оптические кабели со свободной укладкой волокна в оптических модулях скрученных вокруг центрального силового элемента (ЦСЭ) (типов ДПТа, ДПТс, ДОТа, ДОТс производства ООО «Иникаб»).

Максимально допустимая растягивающая нагрузка пропорционально предельно допустимому удлинению самого кабеля и оптического волокна.

Удлинение кабеля приводит к тому, что волокна, расположенные в центре модуля, начинают смещаться к внутренней поверхности модуля у ЦСЭ (рис. 1).

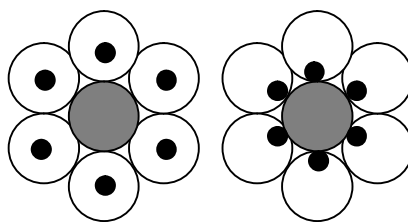


Рис. 1. Расположение волокон в оптическом модуле.

При этом еще не происходит удлинения волокна. При дальнейшем удлинении волокно распрямляется за счет избыточной длины в модуле. После распрямления начинает удлиняться само волокно, при этом оно не должно превысить некоторого допустимого значения. Поэтому допустимое удлинение кабеля вычисляется по следующей формуле:

$$\varepsilon_{доп} = \varepsilon_{к} + \varepsilon_{изб} + \varepsilon_{ог} ,$$

где, $\varepsilon_{доп}$ – максимально допустимое удлинение кабеля;

$\varepsilon_{к}$ – допустимое удлинение кабеля, при котором волокно не подвергается механическому напряжению;

$\varepsilon_{изб}$ – избыточная длина волокна в модуле;

$\varepsilon_{ов}$ – максимально допустимое удлинение оптического волокна.

Избыточная длина волокна в модуле закладывается при его изготовлении и задается изготовителем ОК.

Максимально допустимое удлинение оптического волокна определяется исходя зависимости срока службы оптического волокна от приложенной растягивающей нагрузки. При определенном сроке службы кабеля в 25 лет, допускается удлинение волокна на величину до 0,25% без ухудшения его свойств в течение всего времени. Следует понимать, что максимально допустимая растягивающая нагрузка действует на кабель максимум несколько суток раз в 10-15 лет [3], что также гарантирует сохранение свойств волокна в течение всего срока службы.

Допустимое удлинение кабеля, при котором волокно не подвергается механическому напряжению, зависит от конструкции, определяемой конкретным изготовителем, и рассчитывается по следующей формуле:

$$\varepsilon_{\kappa} = -1 + \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 R^2}{S^2} \left(2 \frac{\Delta R}{R} - \frac{\Delta R^2}{R^2} \right)}$$

где, R – радиус скрутки;

S – шаг скрутки;

ΔR – зазор между оптическим волокном и внутренней стенкой модуля.

Путем увеличения радиуса скрутки и зазора (внутреннего пространства модуля), а также уменьшения шага скрутки можно получить большее допустимое удлинение кабеля без механического напряжения волокна. При этом шаг скрутки не должен быть меньше определенной величины, определяемой минимальным радиусом кривизны волокна за счет спиральной скрутки модулей.

Таким образом, зная начальный модуль упругости кабеля, его сечение и допустимое удлинение, можно определить максимально допустимую растягивающую нагрузку на кабель (МДРН):

$$МДРН = E_{каб} S_{каб} \varepsilon_{доп}$$

Именно эта расчетная величина, указывается изготовителем в характеристиках кабеля. Соответственно, при расчете нагрузок, действующих на кабель при заданных условиях эксплуатации необходимо, чтобы они не превышали МДРН кабеля.

1.4. Прочие допустимые нагрузки.

Допустимая монтажная нагрузка (ДМН) – нагрузка, которая допустима при монтаже кабеля и его прокатке через ролики.

Максимально допустимая монтажная нагрузка (МДМН) – нагрузка, которая допустима при выставлении монтажных стрел провеса.

Разрывная нагрузка – нагрузка, при которой происходит разрыв кабеля.

Значения данных нагрузок зависят от механических свойств кабеля, как совокупности конструкции и материалов (в первую очередь количества силовых элементов), а, следовательно, пропорциональны значению МДРН.

1.5. Масса кабеля.

Рассчитывается как масса отдельных материалов из которых состоит кабель.

$$M_{каб} = M_{ЦСЭ} + M_{ОВ} + M_{ПБТ} + M_{корд} + M_{зв} + M_{зн} + M_{пр.об.} + M_{нить} + M_{об}$$

где $M_{ЦСЭ}$, $M_{ОВ}$, $M_{ПБТ}$, $M_{корд}$, $M_{зв}$, $M_{зн}$, $M_{пр.об.}$, $M_{нить}$, $M_{об}$ - массы центрального силового элемента, оптических волокон, ПБТ, корделей, гидрофобов внутримодульного и межмодульного, промежуточной оболочки, силовых нитей и наружной оболочки соответственно.

1.6. Наружный диаметр кабеля.

Рассчитывается следующим образом:

$$D_{\text{каб}} = D_{\text{скр}} + 2h_{\text{пр.об.}} + 2h_{\text{нить}} + 2h_{\text{об}}$$

Где $D_{\text{скр}}$ – диаметр по скрутке, который складывается из диаметра центрального силового элемента и диаметров оптических модулей;

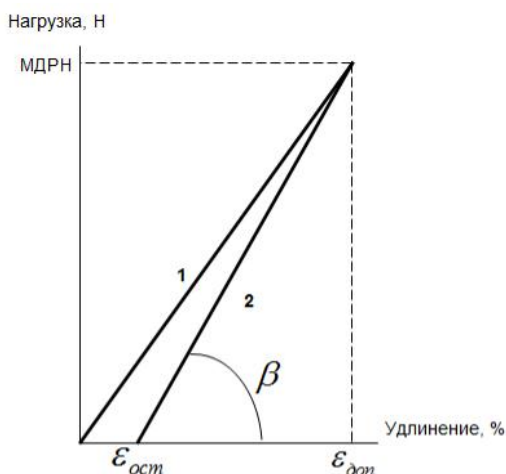
$h_{\text{пр.об.}}$ – толщина промежуточной оболочки (при ее наличии);

$h_{\text{нить}}$ – толщина слоя силовых нитей;

$h_{\text{об.}}$ – толщина наружной оболочки.

1.7. Конечный модуль упругости.

Первоначальное удлинение оптического кабеля при увеличении прикладываемой нагрузке происходит по начальному модулю упругости. Однако после снятия максимальной нагрузки, в кабеле остается остаточное удлинение (см. рис)



Далее растяжение-сжатие происходит по прямой 2 на рисунке, соответственно расчет нужно проводить по конечному модулю упругости, определяемому как тангенс угла между получившейся прямой 2 и осью удлинения.

Для определения конечного модуля упругости необходимо провести тест на растяжение-сжатие. К кабелю прикладывается растягивающая нагрузка, возрастающая до МДРН. Параллельно фиксируется удлинение кабеля.

Далее растягивающая нагрузка снимается и фиксируется остаточное удлинение. Точка на графике, соответствующая этому растяжению, соединяется с точкой, соответствующей МДРН и максимально допустимому удлинению кабеля.

Тангенс угла между получившейся прямой 2 и осью удлинения будет равен конечному модулю упругости:

$$E_{\text{кон}} = \tan \beta = \frac{\text{МДРН}}{(\varepsilon_{\text{дон}} - \varepsilon_{\text{ост}}) \cdot S_{\text{каб}}},$$

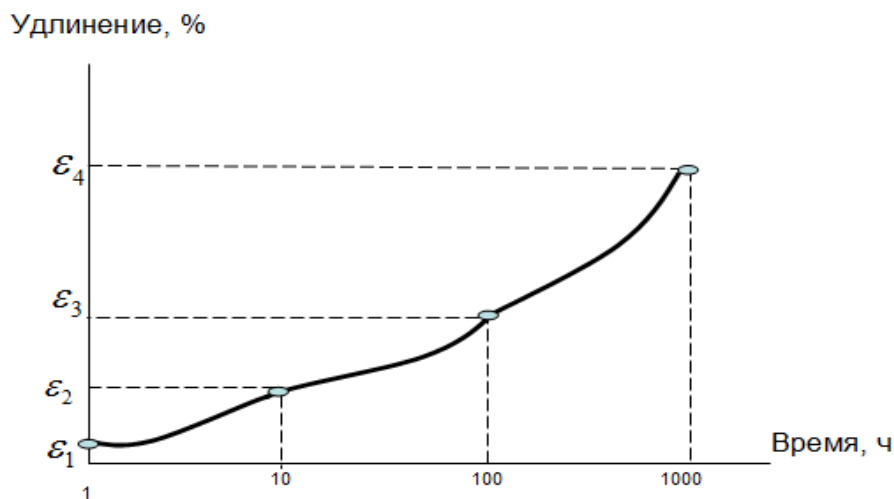
где $\varepsilon_{\text{дон}}$ - остаточное удлинение кабеля.

1.8. Модуль упругости после вытяжки.

При расчетах необходимо учитывать вытяжку кабеля при среднеэксплуатационной нагрузке. Вытяжка кабелей имеет место для всех типов кабелей, в независимости от материала армирующих элементов. Величина вытяжки определяется как свойствами кабеля, так и величиной растягивающей нагрузки. При проектировании подвески кабеля необходимо рассчитывать стрелы провеса и тяжения кабеля с учетом его вытяжки при среднеэксплуатационной нагрузке, которая не всегда бывает определяющей в эксплуатации, а также и в режиме после воздействия максимальной внешней нагрузки, воздействие которой, может приводить к большей остаточной деформации кабелей. Условия, при которых удлинение кабеля будет наибольшим при его

эксплуатации, определяются условиями подвески (длина пролета, стрела провеса, внешние климатические нагрузки) и физико-механическими параметрами кабеля.

Для определения модуля упругости после вытяжки проводят тест на вытяжку в соответствии с IEEE 1222. К кабелю прикладывается растягивающая нагрузка, равная 50% МДРН. При этом температура должна оставаться постоянной. Регистрируются удлинения кабеля через 1, 10, 100 и 1000ч.



Получившийся график зависимости вытяжки от времени описывается функцией:

$$\varepsilon = A(t)^B,$$

где ε – удлинение кабеля;

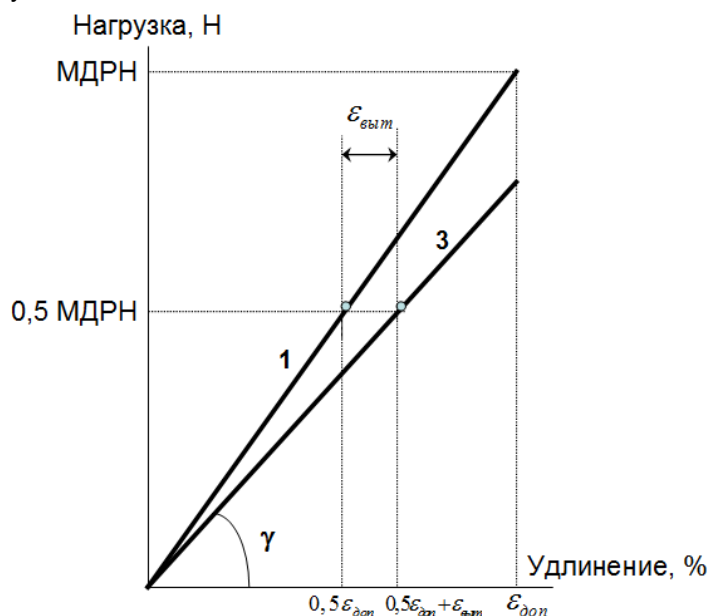
t – время, ч;

A, B – коэффициенты, вычисляемые из эксперимента.

Коэффициент A определяется как вытяжка, зафиксированная через 1 час после начала эксперимента. Коэффициент B определяется путём подстановки в уравнения текущего значения вытяжки, времени и известного значения коэффициента A :

$$B = \frac{\log \varepsilon - \log A}{\log t}$$

Зная коэффициенты A и B , можно вычислить величину вытяжки кабеля через 25 лет при значении нагрузки 50% от МДРН. Через соответствующую точку можно построить зависимость удлинения от нагрузки для СОК при учёте 25 летней вытяжки.



Тангенс угла между получившейся прямой и осью удлинения будет равен модулю упругости после вытяжки:

$$E_{\text{выт}} = \tan \gamma = \frac{\left(\frac{\varepsilon_{\text{доп}}}{0,5\varepsilon_{\text{доп}} + \varepsilon_{\text{выт}}} \right) \cdot 0,5MДРН}{\varepsilon_{\text{доп}} \cdot S_{\text{каб}}},$$

где $\varepsilon_{\text{выт}}$ – удлинение СОК после 25 летней вытяжки.

1.9. Минимально допустимый радиус изгиба кабеля.

Определяется по следующей формуле:

$$R_{\text{изг.мин.}} = 20D_{\text{каб}}$$

1.10. Температурный коэффициент линейного расширения.

ТКЛР всех элементов в кабеле (кроме арамидных нитей) имеет положительное значение.

ТКЛР арамидных нитей имеет отрицательное значение.

ТКЛР всего кабеля будет определяться исходя из условия равновесия всех элементов, входящих в кабель, по следующей формуле:

$$\alpha_{\text{каб}} = \frac{\sum_{i=1}^m \alpha_i E_i S_i}{E_i S_i}$$

Где α_i - ТКЛР каждого элемента кабеля.

1.11. Температуры эксплуатации и монтажа.

Температурный диапазон эксплуатации определяется исходя из требований, указанных в «Правилах применения оптических кабелей связи, пассивных оптических устройств и устройств для сварки оптических волокон», утвержденных Приказом Мининформсвязи России № 47 от 19.04.2006г.

Минимально допустимая температура монтажа определяется исходя из проведенных испытаний на изгиб кабеля при отрицательных температурах и обеспечивается соответствующими применяемыми материалами и технологией производства.

1.12. Максимально допустимый потенциал электрического поля.

Максимально допустимый потенциал электрического поля определяется исходя из типа материала применяемого в оболочке.

Обычный полиэтилен средней или высокой плотности в оболочке допускает максимальное воздействие потенциала электрического поля в 12 кВ.

Трекингостойкий полиэтилен в оболочке допускает максимальное воздействие потенциала электрического поля в 24 кВ.

2. Расчет стрел провеса и нагрузок при различных климатических условиях.

2.1. Вес кабеля.

Вес кабеля в Н/м рассчитывается исходя из заданной массы кабеля кг/км по следующей формуле:

$$W_{\text{каб}} = \frac{mg}{1000}$$

Где g – ускорение свободного падения, м/с².

2.2. Растягивающая нагрузка, действующая на кабель.

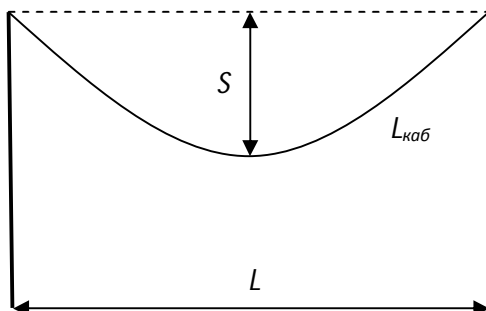
Растягивающая нагрузка, H , действующая на кабель вычисляется следующим образом:

$$H = \frac{WL^2}{8S}$$

где W – линейный вес кабеля, Н/м;

L – расстояние между опорами, м;

S – стрела провеса, м – определяемая как максимальная величина, на которую провисает кабель от горизонтальной линии между точками подвеса кабеля.



Исходя из формулы, видно, что нагрузка на кабель увеличивается с увеличением веса кабеля и расстояния между опорами и уменьшается при увеличении стрелы провеса.

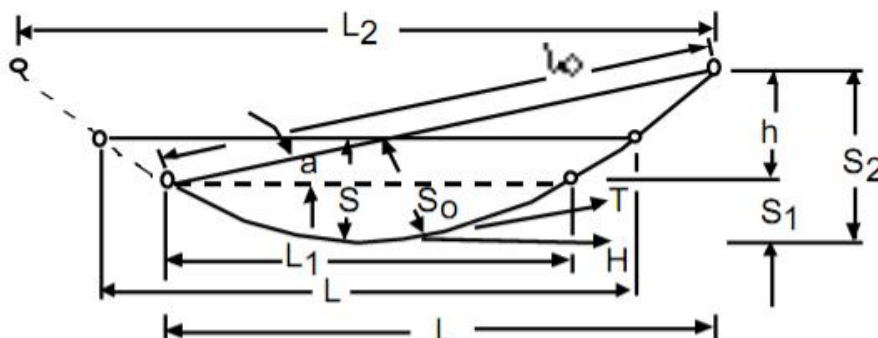
Начальная нагрузка на кабель:

$$H_{нач} = \frac{WL^2}{8S_{нач}}$$

2.3. Перепад высот между опорами.

При разной высоте точек подвеса, кривая провисания кабеля будет несимметричной и низшая точка этой кривой будет находиться не посередине, а ближе к более низкой опоре.

В данном случае, для расчета стрел провеса удобно пользоваться значениями эквивалентных пролетов.



Можно достроить левую ветвь кривой до точки, одинаковой по высоте с правой, и получить симметричную кривую.

Расстояние L_1 называется малым эквивалентным пролетом, а расстояние L_2 – большим эквивалентным пролетом.

Расстояния L_1 и L_2 рассчитываются следующим образом:

$$L_1 = L - \frac{2hH_{нач}}{WL}$$

$$L_2 = L + \frac{2hH_{нач}}{WL}$$

Стрелы провеса S_1 и S_2 :

$$S_1 = \frac{WL_1^2}{8H}$$

$$S_2 = \frac{WL_2^2}{8H}$$

Где h – перепад высот между точками подвеса кабеля, м.
В случае подвеса кабеля на одном уровне $L_1=L_2=L$ и $S_1=S_2=S$.

2.4. Длина подвешенного кабеля.

Очевидно, что длина подвешенного кабеля больше расстояния между опорами, за счет некоторого провиса кабеля и она, тем больше, чем больше стрела провиса.
Длина подвешенного кабеля рассчитывается следующим образом:

$$L_{каб} = L + \frac{4}{3} \left(\frac{S_1^2}{L_1} + \frac{S_2^2}{L_2} \right)$$

2.5. Длина кабеля в ненагруженном состоянии:

Для дальнейших расчетов необходимо знать длину кабеля между опорами, как если бы он не находился под действием растягивающих нагрузок ($H = 0$). Данная величина называется длиной кабеля в ненагруженном состоянии, $L_{н0}$:

$$L_{н0} = \frac{L_{каб}}{1 + \left(\frac{H}{E_{каб} S_{каб}} \right)}$$

2.6. Длина кабеля в ненагруженном состоянии с учетом температуры:

Дальше необходимо определить длину кабеля в ненагруженном состоянии с учетом температуры кабеля, $L_{нк}$. Под действием температуры кабель может, как удлиняться, так и сжиматься и эта способность определяется температурным коэффициентом линейного расширения кабеля (ТКЛР, $1/^\circ\text{C}$).

$$L_{нк} = L_{н0} \left[1 + \text{ТКЛР} (T - T_{cp}) \right]$$

где T – температура кабеля в условиях эксплуатации; T_{cp} – средняя температура эксплуатации.

2.7. Вес кабеля при воздействии максимального гололеда.

В некоторые периоды эксплуатации происходит обледенение оптического кабеля подвешенного между опорами. При этом величина обледенения зависит от географического местоположения подвешенного кабеля и определяется районами гололедности по классификации и картам гололедных районов РФ, согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) – 7 ред.

Гололедная нагрузка действует на кабель вертикально вниз.

Исходя из заданного района гололедности определяют толщину стенки льда на кабеле и рассчитывают вес кабеля в условиях обледенения:

$$W_z = W + \rho_n g \pi K_i K_d \frac{C(d + C)}{100}$$

Где ρ_n – объемная масса гололеда (обычно $0,9 \cdot 10^{-3}$), кг/см³;

C – толщина стенки гололеда, мм;

d – диаметр кабеля, мм;

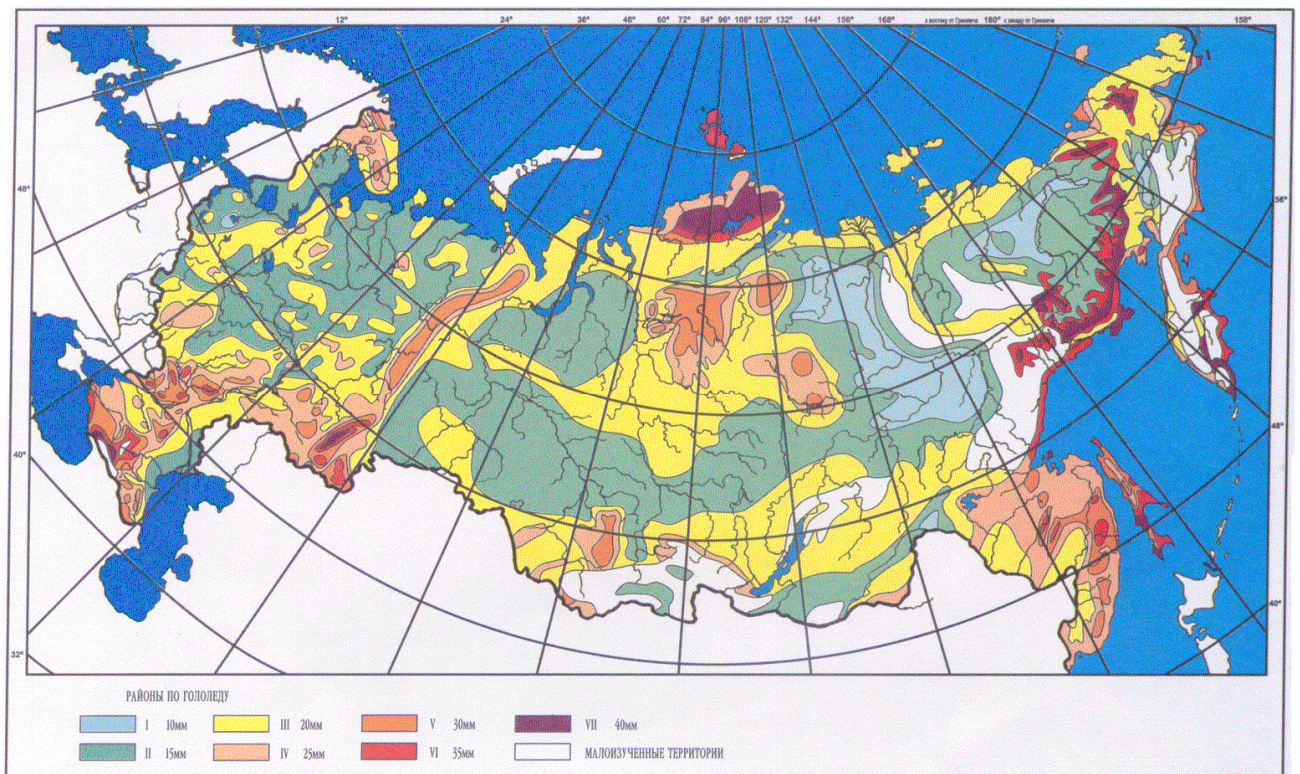
K_i и K_d – коэффициенты учитывающий изменение толщины стенки гололеда по высоте и в зависимости от диаметра провода.

Коэффициенты K_i и K_d учитывающие изменение толщины стенки гололеда

Высота расположения приведенного центра тяжести проводов, тросов и средних точек зон конструкций опор над поверхностью земли, м	Коэффициент учитывающий изменение толщины стенки гололеда по высоте над поверхностью земли	K_i , Диаметр провода (троса), мм	Коэффициент учитывающий изменение толщины стенки гололеда в зависимости от диаметра провода (троса)
25	1,0	10	1,0
30	1,4	20	0,9
50	1,6	30	0,8
70	1,8	50	0,7
100	2,0	70	0,6

Примечание. Для промежуточных высот и диаметров значения коэффициентов K_i и K_d определяются линейной интерполяцией.

Нормативную толщину стенки гололеда плотностью $0,9 \text{ г/см}^3$ следует принимать по табл. в соответствии с картой районирования территории России по толщине стенки гололеда или по региональным картам районирования.



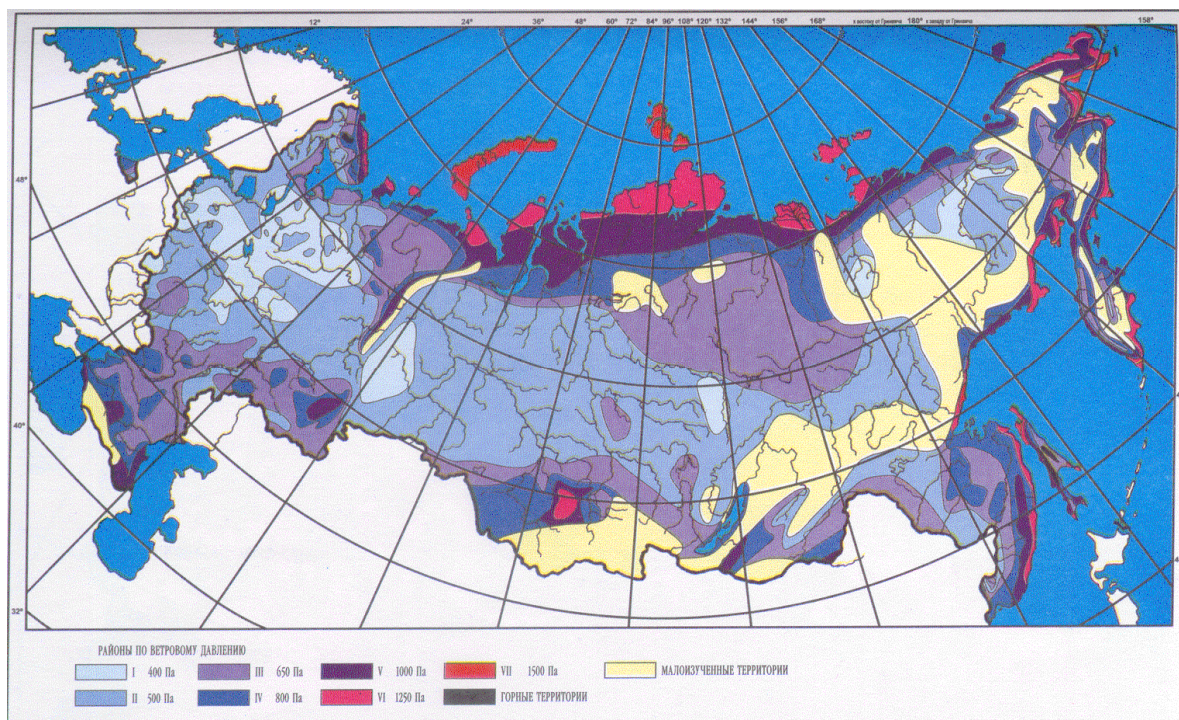
Карта районирования территории РФ по толщине стенки гололеда

Нормативная толщина стенки гололеда b_g для высоты 10 м над поверхностью земли

Район по гололеду	Нормативная толщина стенки гололеда b_g , мм
I	10
II	15
III	20
IV	25
V	30
VI	35
VII	40
Особый	Выше 40

2.8. Ветровая нагрузка на кабель при гололеде.

Также необходимо учитывать, что в процессе эксплуатации на подвешенный оптический кабель действуют ветровые нагрузки и следует рассчитать максимальную нагрузку под воздействием ветра. Для этого, исходя из географического места подвеса кабеля, по классификации и картам районов РФ по максимальной ветровому давлению (или скорости ветра), выбирают необходимое значение.



Ветровая нагрузка действует на кабель в горизонтальном направлении, перпендикулярном его оси.

Ветровая нагрузка (Н/м) рассчитывается следующим образом:

$$W_w = \alpha_w K_l K_w C_x W(d_{каб} + 2K_i K_d C) \cdot 10^{-3}$$

где α_w - коэффициент, учитывающий неравномерность ветрового давления по пролету ВЛ, принимаемый равным:

Ветровое давление, Па	До 200	240	280	300	320	360	400	500	580 и более
Коэффициент α_w	1	0,94	0,88	0,85	0,83	0,80	0,76	0,71	0,70

Промежуточные значения α_w определяются линейной интерполяцией;

K_l - коэффициент, учитывающий влияние длины пролета на ветровую нагрузку, равный 1,2 при длине пролета до 50 м, 1,1 - при 100 м, 1,05 - при 150 м, 1,0 - при 250 м и более (промежуточные значения K_l определяются интерполяцией);

K_w - коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте в зависимости от типа местности, определяемый по табл:

Изменение коэффициента K_w по высоте в зависимости от типа местности

Высота расположения приведенного центра тяжести проводов, тросов и средних точек зон конструкций опор ВЛ над поверхностью земли, м	Коэффициент K_w для типов местности		
	A	B	C
До 15	1,00	0,65	0,40
20	1,25	0,85	0,55
40	1,50	1,10	0,80
60	1,70	1,30	1,00
80	1,85	1,45	1,15
100	2,00	1,60	1,25
150	2,25	1,90	1,55
200	2,45	2,10	1,80
250	2,65	2,30	2,00
300	2,75	2,50	2,20
350 и выше	2,75	2,75	2,35

По условиям воздействия ветра на ВЛ различают три типа местности:

A - открытые побережья морей, озер, водохранилищ, пустыни, степи, лесостепи, тундра;

B - городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой не менее 2/3 высоты опор;

C - городские районы с застройкой зданиями высотой более 25 м, просеки в лесных массивах с высотой деревьев более высоты опор, орографически защищенные извилистые и узкие склоновые долины и ущелья.

C_x - коэффициент лобового сопротивления, принимаемый равным: 1,1 - для кабелей, свободных от гололеда, диаметром 20 мм и более; 1,2 - для всех кабелей, покрытых гололедом, и для всех проводов и тросов, свободных от гололеда, диаметром менее 20 мм;

W - нормативное ветровое давление, Па, в рассматриваемом режиме:

- в режиме максимального ветра: $W = W_0$ - определяется по табл. в зависимости от ветрового района:

Нормативное ветровое давление W_0 на высоте 10 м над поверхностью земли

Район по ветру	Нормативное ветровое давление W_0 , Па (скорость ветра v_0 , м/с)
I	400 (25)
II	500 (29)
III	650 (32)
IV	800 (36)
V	1 000 (40)
VI	1 250 (45)
VII	1 500 (49)
Особый	Выше 1 500 (выше 49)

- в режиме максимального гололеда:

$W = W_r$ – определяется, следующим образом:

Нормативное ветровое давление при гололеде W_r с повторяемостью 1 раз в 25 лет определяется по скорости ветра при гололеде v_r .

Скорость ветра v_r принимается по региональному районированию ветровых нагрузок при гололеде или определяется по данным наблюдений согласно методическим указаниям по расчету климатических нагрузок. При отсутствии региональных карт и данных наблюдений $W_r = 0,25 W_0$.

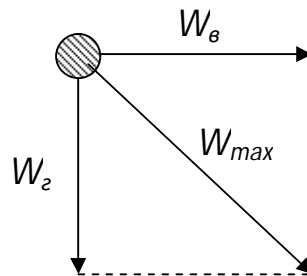
Если в исходных данных известна скорость ветра v_0 , то ветровое давление (Па) определяется следующим образом:

$$W = \frac{v^2}{1,6}$$

2.9. Максимальная нагрузка, действующая на кабель.

Совместное действие вертикальной гололедной нагрузки и горизонтальной ветровой определяется как максимальная нагрузка по следующей формуле:

$$W_{\max} = \sqrt{W_{\Gamma}^2 + W_{\text{в}}^2}$$



2.10. Расчет максимальной стрела провиса.

2.10.1. Определив максимальную нагрузку, можно узнать длину кабеля в нагруженном состоянии (из п. 2.5. и п. 2.2.):

$$L_{\max} = L_{\text{нк}} \left[1 + \left(\frac{W_{\max} L^2}{8 S_{\max} E_{\text{каб}} S_{\text{каб}}} \right) \right]$$

2.10.2. Эта же величина равна:

$$L_{\max} = L + \frac{4}{3} \left(\frac{S_1^2}{L_1} + \frac{S_2^2}{L_2} \right)$$

2.10.3. Из п.п. 2.2. и 2.4.

$$S_1 = \frac{S L_1^2}{L^2}$$

$$S_2 = \frac{S L_2^2}{L^2}$$

2.10.4. Подставив выражения из 2.10.3. в 2.10.2. получим:

$$L_{\max} = L + \left(\frac{4 S^2}{3 L^4} \right) (L_1^3 + L_2^3)$$

2.10.5. Из п.2.4 находим:

$$L_1 = L \left(1 - \frac{h}{4S} \right)$$

$$L_2 = L \left(1 + \frac{h}{4S} \right)$$

Тогда:

$$L_1^3 + L_2^3 = L^3 \left(2 + \frac{3h^2}{8S^2} \right)$$

2.10.6. Подставим выражение из п.2.10.5. в выражение из п.2.10.4.:

$$L_{\max} = L + \left(\frac{8S_{\max}^2}{3L} \right) + \left(\frac{h^2}{2L} \right)$$

2.10.7. Приравняем выражения из 2.10.1. и 2.10.6.:

$$L + \left(\frac{8S_{\max}^2}{3L} \right) + \left(\frac{h^2}{2L} \right) - L_{\text{нк}} - \frac{L_{\text{нк}} W_{\max} L^2}{8S_{\max} E_{\text{каб}} S_{\text{каб}}} = 0$$

После преобразования, получим кубическое уравнение следующего вида:

$$S_{\max}^3 + S_{\max} \left(\frac{3L}{8} \right) \left(L + \frac{h^2}{2L} - L_{\text{нк}} \right) - \left(\frac{3L}{8} \right) \left(\frac{L_{\text{нк}} W_{\max} L^2}{8E_{\text{каб}} S_{\text{каб}}} \right) = 0$$

2.10.8. Т. е.:

$$S_{\max}^3 + aS_{\max} + b = 0$$

где:

$$a = \frac{3 \left(L^2 + \frac{h^2}{2} - LL_{\text{нк}} \right)}{8}$$

$$b = \frac{-3W_{\max} L^3 L_{\text{нк}}}{64E_{\text{каб}} S_{\text{каб}}}$$

2.10.9. Решив кубическое уравнение можно получить значения максимальной стрелы провиса при наиболее сложных погодных условиях:

Если

$$\left(\frac{a}{3} \right)^3 + \left(\frac{-b}{2} \right)^2 \geq 0$$

то:

$$S_{\max} = \sqrt[3]{\left(\frac{-b}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{a}{3}\right)^3 + \left(\frac{-b}{2}\right)^2}} + \sqrt[3]{\left(\frac{-b}{2}\right) - \sqrt{\left(\frac{a}{3}\right)^3 + \left(\frac{-b}{2}\right)^2}}$$

Если

$$\left(\frac{a}{3}\right)^3 + \left(\frac{-b}{2}\right)^2 < 0$$

то:

$$S_{\max} = 2\sqrt{\frac{-a}{3}} \cos\left\{\left(\frac{1}{3}\right) \cos^{-1}\left[\frac{\left(\frac{-b}{2}\right)}{\left(\frac{-a}{3}\right)^{3/2}}\right]\right\}$$

2.11. Максимальная растягивающая нагрузка при наихудших условиях.

Зная максимальную стрелу провиса кабеля, легко найти (по аналогии с п.2.2.) максимальную растягивающую нагрузку, действующую на кабель, при наихудших погодных условиях:

$$H_{\max} = \frac{W_{\max} L^2}{8S_{\max}}$$

Эквивалентные пролеты и стрелы провиса при переде высот между опорами рассчитываются по аналогии с п.2.3, только вместо начального веса и нагрузки подставляются максимальный вес и максимальная нагрузка:

$$L_{1\max} = L - \frac{2hH_{\max}}{W_{\max} L}$$

$$L_{2\max} = L + \frac{2hH_{\max}}{W_{\max} L}$$

$$S_{1\max} = \frac{W_{\max} L_1^2}{8H_{\max}}$$

$$S_{2\max} = \frac{W_{\max} L_2^2}{8H_{\max}}$$

2.12. Расчет монтажной стрелы провеса, нагрузки и монтажной таблицы.

По п. 2.6. определяется длина кабеля в ненагруженном состоянии с учетом монтажной температуры:

$$L_{н.монт} = L_{но} \left[1 + ТКЛР(T_{монт} - T_{ср})\right]$$

Далее расчет ведется, согласно п.п. 2.10.8, 2.10.9 и 2.11 подставляя соответствующую длину кабеля в ненагруженном состоянии ($L_{монт}$), модуль упругости кабеля $E_{каб}$ и вес кабеля W и определяется стрела провеса при соответствующей температуре монтажа ($S_{монт}$) и нагрузка ($H_{монт}$).

Монтажная таблица – монтажные нагрузки и стрелы провиса при различных температурах монтажа исходя из заданной начальной нагрузки.

Расчет монтажной таблицы ведется аналогично расчету максимальной нагрузки и стрел.

Определяется длина кабеля в ненагруженном состоянии при различной температуре:

$$L_{\text{МОН.нк}} = L_{\text{но}} \left[1 + \text{TKЛП}(T_{\text{мон}} - T_{\text{ср}}) \right]$$

где $T_{\text{мон}}$ – температура кабеля в условиях эксплуатации; $T_{\text{ср}}$ – средняя температура эксплуатации.

Эта длина используется при расчете коэффициентов для определения монтажной стрелы провеса, в качестве веса используется вес кабеля в нормальных условиях:

$$a = \frac{3 \left(L^2 + \frac{h^2}{2} - LL_{\text{МОНнк}} \right)}{8}$$

$$b = \frac{-3W_{\text{каб}} L^3 L_{\text{МОНнк}}}{64E_{\text{каб}} S_{\text{каб}}}$$

По рассчитанным коэффициентам вычисляется $S_{\text{мон}}$ и $H_{\text{мон}}$, согласно п.2.10.9 и 2.11.

2.13. Расчет конечной стрелы провеса и нагрузки при нормальных условиях.

После воздействия на кабель максимально тяжелого режима (гололед с ветром), кабель возвращается (сжимается) в нормальное состояние по конечному модулю упругости, т.е. остается остаточное удлинение (см. п.1.7).

Для того чтобы рассчитать конечную стрелу провеса и нагрузку при нормальных условиях необходимо определить длину кабеля при воздействии максимальной нагрузки:

$$L_{\text{каб.к.}} = L + \frac{4}{3} \left(\frac{S_{1\text{max}}^2}{L_{1\text{max}}} + \frac{S_{2\text{max}}^2}{L_{2\text{max}}} \right)$$

Далее эта длина приводится к длине кабеля в ненагруженном состоянии по конечному модулю упругости:

$$L_{\text{кк}} = L_{\text{к0}} = \frac{L_{\text{каб.к.}}}{1 + \left(\frac{H_{\text{max}}}{E_{\text{кон.}} S_{\text{каб}}} \right)}$$

Затем по п.п. 2.10.8, 2.10.9 и 2.11 (подставляя W , $L_{\text{кк}}$, $E_{\text{кон}}$) находим конечную стрелу провеса $S_{\text{н.кон}}$ и нагрузку $H_{\text{н.кон}}$.

Эквивалентные длины пролетов и стрел провеса (при наличии перепада высот между опорами) определяются согласно п. 2.3., подставляя вес кабеля и рассчитанную нагрузку.

2.13. Расчет стрелы провеса и нагрузки при нормальных условиях после реализации вытяжки.

В процессе эксплуатации кабеля при подвесе происходит его вытяжка (см. п.1.8).

Для того, чтобы определить стрелу провеса $S_{\text{н.выт.}}$ и нагрузку $H_{\text{н.выт.}}$ после вытяжки, необходимо воспользоваться формулами из п.п. 2.10.8, 2.10.9 и 2.11, подставляя в коэффициент b вместо начального модуля упругости, модуль упругости после вытяжки $E_{\text{выт.}}$. Вес принимается равным весу кабеля.

Эквивалентные длины пролетов $L_{1\text{н.выт.}}$, $L_{2\text{н.выт.}}$ и стрел провеса $S_{1\text{н.выт.}}$, $S_{2\text{н.выт.}}$ (при наличии перепада высот между опорами) определяются согласно п. 2.3., подставляя вес кабеля и рассчитанную нагрузку.

2.14. Расчет стрел провеса и нагрузок при минимальной и максимальной температуре эксплуатации после реализации вытяжки.

По п. 2.6. определяется длина кабеля в ненагруженном состоянии с учетом минимальной или максимальной температуры:

$$L_{H \min T} = L_{но} \left[1 + ТКЛР(T_{\min} - T_{cp}) \right]$$

$$L_{H \max T} = L_{но} \left[1 + ТКЛР(T_{\max} - T_{cp}) \right]$$

Далее расчет ведется, согласно п.п. 2.10.8, 2.10.9 и 2.11 подставляя соответствующую длину кабеля в ненагруженном состоянии ($L_{H \min T}$, $L_{H \max T}$), модуль упругости вытяжки $E_{выт}$ и вес кабеля W и определяется стрела провеса при соответствующей температуре ($S_{H \min T}$, $S_{H \max T}$) и нагрузки ($H_{H \min T}$, $H_{H \max T}$).

2.15. Расчет стрелы провеса и нагрузки при максимальных условиях (гололед + ветер) после реализации вытяжки.

Определяется длина кабеля между опорами по п.2.4. подставляя соответствующие значения эквивалентных пролетов и стрел провеса после вытяжки в нормальных условиях (по п.2.4):

$$L_{каб.выт} = L + \frac{4}{3} \left(\frac{S_{1н.выт}^2}{L_{1н.выт}} + \frac{S_{2н.выт}^2}{L_{2н.выт}} \right)$$

Затем определяется длина кабеля в ненагруженном состоянии (по конечному модулю упругости) по п.2.5.:

$$L_{каб.выт0} = \frac{L_{каб.выт}}{1 + \left(\frac{H_{н.выт.}}{E_{кон} S_{каб}} \right)}$$

С учетом температуры:

$$L_{к.каб.выт} = L_{каб.выт0} \left[1 + ТКЛР(T - T_{cp}) \right]$$

Далее расчет ведется, согласно п.п. 2.10.8, 2.10.9 и 2.11 подставляя соответствующую длину кабеля после вытяжки ($L_{к.каб.выт}$), конечный модуль упругости $E_{кон}$, максимальную нагрузку W_{max} (из п.2.9) и определяется стрела провеса при максимальных нагрузках после вытяжки ($S_{тахвыт}$) и нагрузка ($H_{тахвыт}$).

Эквивалентные длины пролетов $L_{1тахвыт}$, $L_{2тахвыт}$ и стрел провеса $S_{1тахвыт}$, $S_{2тахвыт}$ (при наличии перепада высот между опорами) определяются согласно п. 2.3., подставляя максимальную нагрузку W_{max} и рассчитанную растягивающую нагрузку $H_{тахвыт}$.

2.16. Определение роли вытяжки при расчете максимальных нагрузок.

Если при воздействии максимальных нагрузок на кабель (гололед и ветер), растягивающая нагрузка после реализации вытяжки (по п.2.15) будет больше растягивающей нагрузки на кабель не подвергшийся вытяжке (по п.2.11):

$$H_{\max выт} > H_{\max}$$

то в таком случае **вытяжка является определяющим фактором** и при расчетах необходимо учитывать стрелы провеса и нагрузки, возникающие после реализации вытяжки (по п.2.15).

Если же максимальная растягивающая нагрузка после вытяжки (по п.2.15) меньше максимальной растягивающей нагрузки без учета вытяжки (по п.2.11):

$$H_{\max \text{ выт}} > H_{\max}$$

то в таком случае **вытяжка НЕ является определяющим фактором** и при расчетах необходимо учитывать стрелы провеса и нагрузки, возникающие после первоначального удлинения кабеля (по п.2.11).

2.17. Расчет стрелы провеса и нагрузки при воздействии максимального гололеда.

Для того, чтобы определить максимальную вертикальную стрелу провеса $S_{\max.вер}$ и нагрузку $H_{\max.вер}$, необходимо воспользоваться формулами из п.п. 2.10.8, 2.10.9 и 2.11, подставляя $L_{к.каб.выт}$ и $E_{кон}$ (если вытяжка – фактор) или $L_{НК}$ и $E_{нач}$ (если вытяжка – не фактор). Вес принимается равным весу кабеля под воздействием гололеда W_{ε} (по п.2.7).

Эквивалентные длины пролетов $L_{1\varepsilon}$, $L_{2\varepsilon}$ и стрел провеса $S_{1\varepsilon}$, $S_{2\varepsilon}$ (при наличии перепада высот между опорами) определяются согласно п. 2.3., подставляя вес кабеля под воздействием льда и рассчитанную нагрузку $H_{\max.вер}$.

2.18. Расчет стрелы провеса и нагрузки при воздействии максимальной силы ветра.

Максимальная ветровая нагрузка, действующая на кабель определяется по п.2.8:

$$W_{\varepsilon \max} = \alpha_w K_l K_w C_x W_0 d_{каб} \cdot 10^{-3}$$

При этом используется максимальное ветровое давление W_0 и диаметр кабеля $d_{каб}$ без воздействия гололеда.

Если максимальная ветровая нагрузка при воздействии гололеда W_{ε} (по п.2.8) больше максимальной ветровой нагрузки без гололеда $W_{\varepsilon \max}$:

$$W_{\varepsilon} > W_{\varepsilon \max}$$

то тогда для данного режима берется ветровая нагрузка при гололеде:

$$W_{\varepsilon \max} = W_{\varepsilon}$$

Для того, чтобы определить максимальную горизонтальную стрелу провеса $S_{\max.гор}$ и нагрузку $H_{\max.гор}$, необходимо воспользоваться формулами из п.п. 2.10.8, 2.10.9 и 2.11, подставляя $L_{к.каб.выт}$ и $E_{кон}$ (если вытяжка – фактор) или $L_{НК}$ и $E_{нач}$ (если вытяжка – не фактор). Вес принимается равным весу кабеля под воздействием максимального ветра $W_{\varepsilon \max}$.

Эквивалентные длины пролетов $L_{1\varepsilon}$, $L_{2\varepsilon}$ и стрел провеса $S_{1\varepsilon}$, $S_{2\varepsilon}$ (при наличии перепада высот между опорами) определяются согласно п. 2.3., подставляя вес кабеля под воздействием ветра $W_{\varepsilon \max}$ и рассчитанную нагрузку $H_{\max.вер}$.

2.19. Проверка допустимости расчетных значений заданным условиям.

Результаты расчетов должны быть проверены на допустимость заданным условиям (в тех частях, где они заданы):

Максимальная растягивающая нагрузка на кабель не должна превышать допустимую:

$$H_{\max} < H_{\max \text{ доп}}$$

Максимальная вертикальная стрела провеса не должна превышать допустимую:

$$S_{\max \text{ вер}} < S_{\max \text{ вер. доп}}$$

Максимальная горизонтальная стрела провеса не должна превышать допустимую:

$$S_{\max \text{ гор}} < S_{\max \text{ гор.дон}}$$

Минимальное расстояние от кабеля (при максимальной вертикальной стреле) до земли не должно быть меньше допустимого:

$$h_{\min} = \text{Высота}_{\text{ подвеса}} - S_{\max \text{ вер}} < h_{\min \text{ дон}}$$

Монтажная нагрузка не должна превышать максимально допустимую монтажную нагрузку:

$$H_{\text{мон}} < \text{МДМН}$$

И другие проверки согласно заданным условиям.

3.1. Расчет стрелы провеса на произвольном расстоянии от одной из опор.

Для того, чтобы рассчитать стрелу провеса на любом расстоянии от одной из опор, достаточно воспользоваться следующей формулой:

$$S_y = S_2 \left(1 - \frac{4 \left(\frac{L_2}{2} - y \right)^2}{L_2^2} \right)$$

Где y – расстояние от более высокой опоры, S_2, L_2 – эквивалентная стрела провеса и расстояние для более высокой опоры, S_y – стрела провеса на заданном расстоянии от более высокой опоры.

3.2. Расчет монтажной таблицы для других расстояний между опорами при заданной начальной стреле провеса или нагрузке.

Если задана начальная стрела провеса, то начальная нагрузка рассчитывается по п. 2.2, подставляя требуемое расстояние между опорами L_x .

Если задана начальная нагрузка, то начальная стрела провеса определяется из формулы по п.2.2:

$$S_{\text{нач}} = \frac{WL_x^2}{8H_{\text{нач}}}$$

Далее расчет ведется по п.п. 2.3-2.6 и 2.12.



Программа «Расчет самонесущего оптического кабеля»

Описание программы.

Оглавление

1.	Внешний вид программы при запуске. Ввод исходных данных.	3
1.1.	Параметры линии.	4
1.2.	Параметры кабеля.	5
1.3.	Климатические условия.	5
2.	Расчет параметров кабеля и линии. Виды расчетов.	6
2.1.	Вкладка «Характеристики кабеля»	6
2.2.	Вкладка «Таблицы нагрузок и стрел»	7
2.3.	Вкладка «Изображение провеса»	8
2.4.	Вкладка «Характеристики всех конструкций»	10
2.5.	Вкладка «Расчет расстояний»	10

1. Внешний вид программы при запуске. Ввод исходных данных.

При запуске программы появляется окно с активной закладкой «Исходные данные», где необходимо ввести все известные исходные данные.

Закладка разделена на три зоны:

- **Параметры линии**, где вводятся параметры и ограничения по проектируемой волоконно-оптической линии.
- **Параметры кабеля**, где вводятся данные по требуемому кабелю.
- **Климатические условия**, где вводятся данные по заданным климатическим воздействиям.

В нижней части зоны **Параметры кабеля** отображается текущая выбранная марка оптического кабеля.

Ввод данных подразделяется на **простой** и **полный**.

Кнопки переключения вида ввода данных находятся в верхнем левом углу формы.

Простой ввод.

Предназначен для быстрого и упрощенного выбора кабеля с необходимой максимально допустимой растягивающей нагрузкой.

Исходные данные

Полный ввод Простой ввод

Теория Помощь О программе

Исходные данные

Параметры линии

Параметры кабеля

Климатические условия

Максимальная длина пролета в линии, м

Самонесущий
 С вынесенным силовым элементом (типа «8»)

Вид силовых элементов:
 Арацидные нити Стеклонити

Наличие промежуточной оболочки

Максимально допустимая растягивающая нагрузка

Число оптических волокон

Тип оптических волокон

Максимальное число волокон в модуле

Число элементов скрутки: 6

Выбран оптический кабель производства «Инкаб» марки **ДПТа-П-16А-2(6)-?кН**

Выбрать район

Скопировать результаты в буфер обмена Вывести результаты в Excel Отобразить детальный отчет

Достаточно выбрать максимальную длину пролета в линии, район монтажа кабеля и выбрать марку кабеля и число волокон.

При нажатии кнопки «Рассчитать» программа автоматически рассчитает требуемую максимально допустимую растягивающую нагрузку. Результаты копируются в буфер обмена, если отмечен соответствующий пункт.

Дополнительно имеются возможности вывода результатов в Microsoft Excel и отображения детального отчета в формате Microsoft Word (при наличии этих программ на компьютере).

Полный ввод.

Предназначен для детального ввода всей информации по проекту линии связи или выбора различных параметров ввода или условий и ограничений.

1.1. Параметры линии.

- *Потенциал электрического поля в точке подвеса оптического кабеля.*

Выбирается из двух значений: «не более 12кВ» - обычное исполнение оболочки кабеля и «не более 24кВ» - кабель изготавливается с трекинговой оболочкой.

- *Максимальная длина пролета в линии.* Обязательный параметр при расчете. Вводится наибольшее расстояние между опорами в проектируемой линии по которому производится расчет кабеля.

- *Стрела провеса начальная (при T_{ср})* – вертикальное расстояние между точкой подвеса и нижней точкой кабеля в пролете. Если есть ограничения или четко заданные условия по начальной стреле провеса (сразу после монтажа линии). Вводится в процентах от максимального расстояния между линиями или в метрах. По умолчанию задано 1%.

- *Начальная нагрузка на кабель.* Если монтаж предполагается осуществлять по фиксированной начальной нагрузке, то вводится данное значение. Вводить можно либо начальную стрелу провеса, либо начальную нагрузку, т.к. это взаимозависимые параметры.

- *Перепад высот при максимальной длине пролета.* Если между опорами с максимальным расстоянием существует перепад высот, то его можно задать в данном параметре.

- *Максимально допустимая стрела провеса при гололеде (вертикальная).* Вводится, если существуют ограничения по данному параметру (например в случае пересечения какого либо объекта или в случае обеспечения безопасного расстояния до других проводов линии).

- *Максимально допустимая стрела провеса при ветре (горизонтальная).* Вводится, если существуют ограничения по данному параметру (например в случае обеспечения безопасного расстояния до других проводов линии).

- *Максимально допустимая нагрузка кабеля по условиям прочности опор.* Данный параметр вводится в случае существующего ограничения по прочности используемых опор.

- *Высота подвеса кабеля.* Данный параметр вводится, если известна высота подвеса кабеля в максимальном пролете. По умолчанию высота подвеса задана в 15 метров для линий с расстояниями между опорами до 300 м и в 30 метров для линий с расстояниями свыше 300 м.

- *Минимальное расстояние кабеля до земли.* Если существуют ограничения по минимально допустимому расстоянию кабеля до земли (регулируется ПУЭ), то вводится данный параметр. По умолчанию задано 5 м.

1.2. Параметры кабеля.

В данной части выбирается кабель, предполагаемый к использованию в проектируемой линии связи.

- *тип кабеля*: самонесущий или с вынесенным силовым элементом (типа «восьмерки»).
- *Вид силовых элементов*. Выбираются либо арамидные нити, либо стеклонити - для самонесущих кабелей, или стеклопластик, либо стальной трос – для кабелей типа «восьмерки».
- *Наличие промежуточной оболочки*. Выбирается наличие или отсутствие промежуточной оболочки в кабеле – для самонесущих кабелей.
- *Одномодульный или со стандартной скруткой* – для кабелей типа «восьмерки».
- *Максимально допустимая растягивающая нагрузка на кабель*. Вводится значение в кН, исходя из требуемых значений при воздействии максимального гололеда с ветром на линии. При выборе параметра «Рассчитать» данное значение автоматически рассчитывается исходя из заданных параметров линии и климатических условий.
- *Число оптических волокон*. Выбирается согласно проекту ВОЛС.
- *Тип оптических волокон* (одномодовое, многомодовое). Выбирается согласно проекту ВОЛС.
- *Максимальное число волокон в модуле*. Выбирается требуемая конструкция оптического модуля и распределение волокон по модулям.
- *Число элементов скрутки*. Рассчитывается автоматически исходя из заданного числа волокон в кабеле и числа волокон в модуле.

1.3. Климатические условия.

Данная часть ввода исходных данных позволяет ввести климатические условия, действующие в зоне подвески кабеля.

Ввести данные можно тремя способами:

- а) выбрать район подвеса кабеля по предложенным из списка городам;
- б) выбрать климатическую зону по ветру и гололеду согласно картам ПУЭ;
- в) ввести данные по скорости ветра (или ветровому давлению) и стенке гололеда вручную исходя из фактических данных по местности.

Далее задается среднеэксплуатационная температура, действующая в местности.

При необходимости (если заранее известны данные) вводится значение температуры, при которой осуществляется монтаж линии.

2. Расчет параметров кабеля и линии. Виды расчетов.

При нажатии кнопки «Расчитать» программа производит несколько видов расчетов и отображает соответствующее число вкладок

2.1. Вкладка «Характеристики кабеля»

The screenshot shows a software window with two main panels. The left panel is titled 'Характеристики кабеля ДПТА-П-16А-2(6)-6кН' and contains a table of cable properties. The right panel is titled 'Характеристики линии ДПТА-П-16А-2(6)-6кН' and contains a table of line characteristics. Below the right table, there is a red warning message: 'Вытяжка — фактор!'.

Параметр	Значение
Максимально допустимая растягивающая нагрузка кабеля, кН	6
Допустимая монтажная растягивающая нагрузка, кН	1,5
Максимально допустимая монтажная растягивающая нагрузка, кН	3,6
Разрывная нагрузка, кН	11
Масса кабеля, кг/км	123,6
Наружный диаметр кабеля, мм	12,8
Площадь поперечного сечения кабеля, мм ²	127,7
Модуль упругости начальный, кН/мм ²	5,15
Модуль упругости конечный, кН/мм ²	5,57
Модуль упругости после вытяжки, кН/мм ²	3,61
Минимально допустимый радиус изгиба кабеля, мм	255
Температурный коэффициент линейного расширения, *10 ⁻⁶ , 1/°C	13,4
Минимальная температура эксплуатации, °C	-60
Максимальная температура эксплуатации, °C	+70
Минимально допустимая температура монтажа, °C	-30
Максимально допустимый потенциал электрического поля, кВ	12

Параметр	Значение
Монтажная нагрузка, кН	1,51
Начальная нагрузка, кН	1,51
Монтажная стрела провеса, м	1
Гололедная нагрузка, кг/м	18,44
Ветровая нагрузка в гололед, кг/м	7,91
Максимальная нагрузка, кг/м	20,07
Стрела провеса максимальная, м	4,69
Максимальная растягивающая нагрузка, кН	5,34
Максимальная стрела провеса вертикальная, м	4,61
Максимальная стрела провеса горизонтальная, м	3,11
Минимальное расстояние кабеля до земли, м	10,38

Вытяжка — фактор!

На данной вкладке отображаются характеристики выбранного оптического кабеля (см. пункт 2.4.), а также следующие характеристики линии:

- *Монтажная нагрузка, кН* – нагрузка на кабель при монтаже и выставлении начальной стрелы провеса;
- *начальная нагрузка, кН* – нагрузка на кабель в начальный момент времени при среднеэксплуатационной температуре;
- *монтажная стрела провеса, м* – стрела провеса, выставляемая при монтаже кабеля;
- *гололедная нагрузка, кг/м* – вес 1 м кабеля с учетом максимальной стенки гололеда на кабель;
- *ветровая нагрузка в гололед, кг/м* – вес 1 м кабеля при воздействии максимального ветра в гололед;
- *максимальная нагрузка, кг/м* – суммарный вес 1 м кабеля при воздействии одновременно гололеда и ветра;
- *стрела провеса максимальная, м* – стрела провеса кабеля при максимальном климатическом режиме (гололед с ветром);
- *максимальная стрела провеса вертикальная, м* – стрела провеса при воздействии максимального гололеда;
- *максимальная стрела провеса горизонтальная, м* – стрела провеса при воздействии максимального ветра;
- *минимальное расстояние кабеля до земли, м* – расстояние кабеля до земли при максимальном гололеде и выбранной высоте подвеса кабеля.

Надпись «**Вытяжка – фактор!**» или «**Вытяжка – не фактор!**». В зависимости от заданных исходных данных показывается, какой модуль упругости имеет большее значение при расчете конечной стрелы провеса в конце срока эксплуатации. Если появляется надпись «**Вытяжка – фактор!**» значит процессы вытяжки оказывают определяющее значение, если надпись «**Вытяжка – не фактор!**», то в таком случае нагружение кабеля до максимального значения по конечному модулю упругости имеет определяющее значение над процессами вытяжки (подробнее см. теоретическую часть расчетов).

В случае превышения заданных максимально допустимых значений, соответствующие ячейки окрашиваются красным цветом и появляются предупредительные надписи и предложение изменить исходные данные.

Полный ввод | Простой ввод | Теория | Помощь | О программе

Исходные данные | **Характеристики кабеля** | Таблицы нагрузок и стрел | Изображение провеса | Характеристики всех конструкций | Расчет расстояний

Характеристики кабеля ДПТс-П-16А-2(6)-10кВ

Максимально допустимая растягивающая нагрузка кабеля, кН	10,2
Допустимая монтажная растягивающая нагрузка, кН	2,6
Максимально допустимая монтажная растягивающая нагрузка, кН	6,1
Разрывная нагрузка, кН	19
Масса кабеля, кг/км	160,4
Наружный диаметр кабеля, мм	14,2
Площадь поперечного сечения кабеля, мм ²	159
Модуль упругости начальный, кН/мм ²	7
Модуль упругости конечный, кН/мм ²	7,56
Модуль упругости после вытязки, кН/мм ²	4,9
Минимально допустимый радиус изгиба кабеля, мм	285
Температурный коэффициент линейного расширения, *10 ⁻⁶ , 1/°C	13,8
Минимальная температура эксплуатации, °C	-60
Максимальная температура эксплуатации, °C	+70
Минимально допустимая температура монтажа, °C	-30
Максимально допустимый потенциал эл. электрического поля, кВ	12

Характеристики линии ДПТс-П-16А-2(6)-10кВ

Монтажная нагрузка, кН	1,96
Начальная нагрузка, кН	1,96
Монтажная стрела провеса, м	1
Гололедная нагрузка, кг/м	46,9
Ветровая нагрузка в гололед, кг/м	25,27
Максимальная нагрузка, кг/м	53,28
Стрела провеса максимальная, м	0,49
Максимальная растягивающая нагрузка, кН	11,48
Максимальная стрела провеса вертикальная, м	5,52
Максимальная стрела провеса горизонтальная, м	4,34
Минимальное расстояние кабеля до земли, м	19,29

Вытяжка — не фактор!

Нагрузка на кабель превышает максимально допустимую!

Измените исходные данные!

2.2. Вкладка «Таблицы нагрузок и стрел»

Полный ввод | Простой ввод | Теория | Помощь | О программе

Исходные данные | Характеристики кабеля | **Таблицы нагрузок и стрел** | Изображение провеса | Характеристики всех конструкций | Расчет расстояний

Монтажная таблица

Температура монтажа	-30°C	-20°C	-10°C	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C
Монтажные нагрузки, кН	2,47 2,47	2,34 2,33	2,21 2,21	2,08 2,08	1,96 1,96	1,84 1,84	1,73 1,73	1,63 1,63	1,53 1,53	1,44 1,44	1,35 1,36
Монтажные стрелы провеса (S виз), м	0,79 0,79	0,83 0,83	0,88 0,88	0,94 0,94	1 1	1,06 1,06	1,13 1,12	1,2 1,2	1,28 1,27	1,36 1,35	1,45 1,44
Минимальная высота кабеля от земли (H мин), м	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Расстояние от левой опоры до нижней точки кабеля (Lл мин), м	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Произвольная монтажная таблица

Расстояние между опорами, м:

Стрела провеса начальная, %:

Нагрузка начальная, кН

← Быстрый счет

Климатические режимы

Режим	Норм.	-60°C	+70°C	Гололед	Ветер	Макс №1	Макс №2
Нагрузки, действующие на кабель (Нагр), кН	1,51	2,1	1,13	10,6	7,27	11,51	11,48
Вертикальная визируемая стрела провеса (S верт), м	1,29	0,93	1,73	5,52	1,29	5,78	5,79
Горизонтальная стрела провеса (S гор), м	0	0	0	0	4,34	0,24	0,23
Минимальная высота кабеля от земли (H мин), м	0	0	0	0	0	0	0
Расстояние от левой опоры до нижней точки кабеля (Lл мин), м	0	0	0	0	0	0	0

Мак №1 максимально тяжелые условия – воздействие гололеда и ветра с учетом вытязки (в конечный период эксплуатации)

Мак №2 максимально тяжелые условия – воздействие гололеда и ветра без учета вытязки (в начальный период эксплуатации)

На данной вкладке присутствуют следующие таблицы:

а) монтажная таблица.

Позволяет определить:

- монтажные нагрузки,
- монтажные стрелы провеса (Sвиз),
- минимальную высоту кабеля от земли (Н мин),
- расстояние от левой опоры до низшей точки кабеля (Lл мин) при различной температуре монтажа (с шагом 10 °С).

б) климатические режимы.

В таблице выводятся значения:

- действующей на кабель нагрузки, кН;
- вертикальной визируемой стрелы провеса (S верт), м;
- горизонтальной стрелы провеса (S гор), м;
- минимальной высоты кабеля от земли (Н мин), м;
- расстояние от левой опоры до низшей точки кабеля (Lл мин) при следующих режимах:
 - нормальный (Норм). При среднеэксплуатационной нагрузке без ветра и гололеда после вытяжки.
 - при температуре -60 °С (Темп=-60С) – Низшая температура эксплуатации без ветра и гололеда.
 - при температуре +70 °С (Темп=+70С) – Высшая температура эксплуатации без ветра и гололеда.
 - максимального гололеда (гололед) – наибольшая стенка льда на кабеле без ветра.
 - максимального ветра (ветер) – наибольшее ветровое давление на кабель без гололеда.
 - максимально тяжелые условия (Макс №1) – воздействие гололеда и ветра с учетом вытяжки (в конечный период эксплуатации)
 - максимально тяжелые условия (Макс №2) – воздействие гололеда и ветра без учета вытяжки (в начальный период эксплуатации).

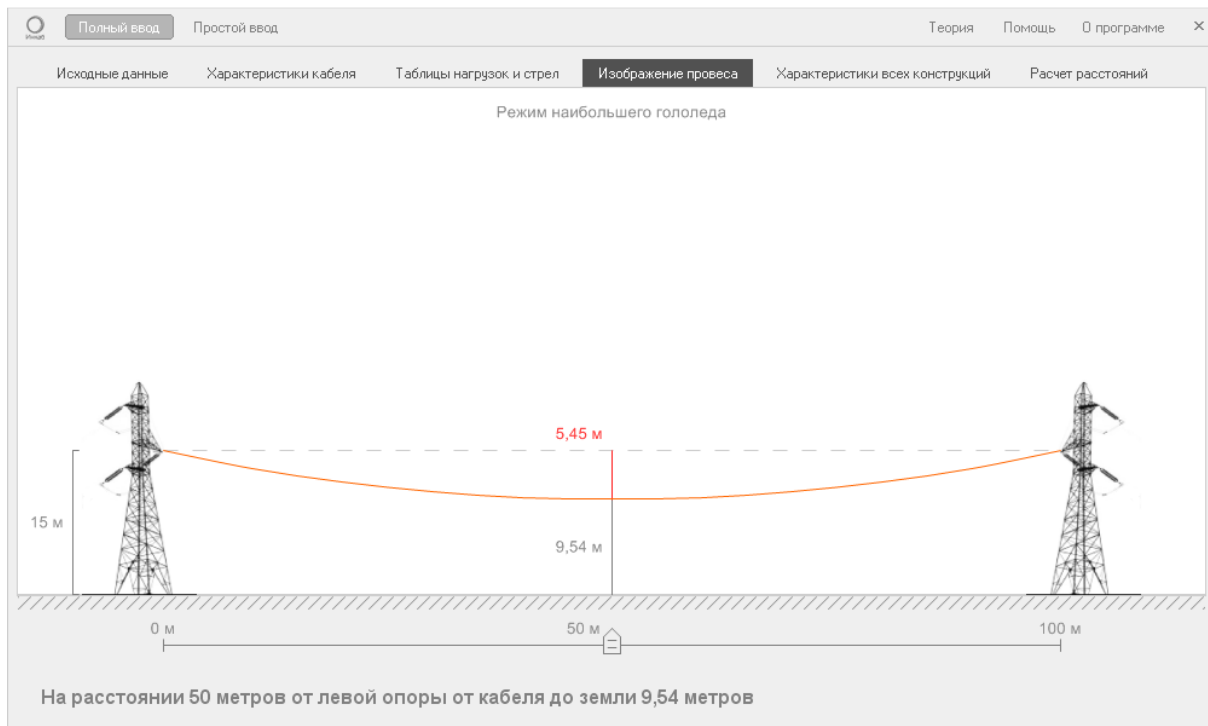
в) произвольная монтажная таблица.

Позволяет рассчитать монтажную таблицу при различных температурах монтажа для произвольного участка ВОЛС с заданным кабелем.

Изменяемые параметры:

- расстояние между опорами
- начальная стрела провеса или начальная нагрузка на кабель.

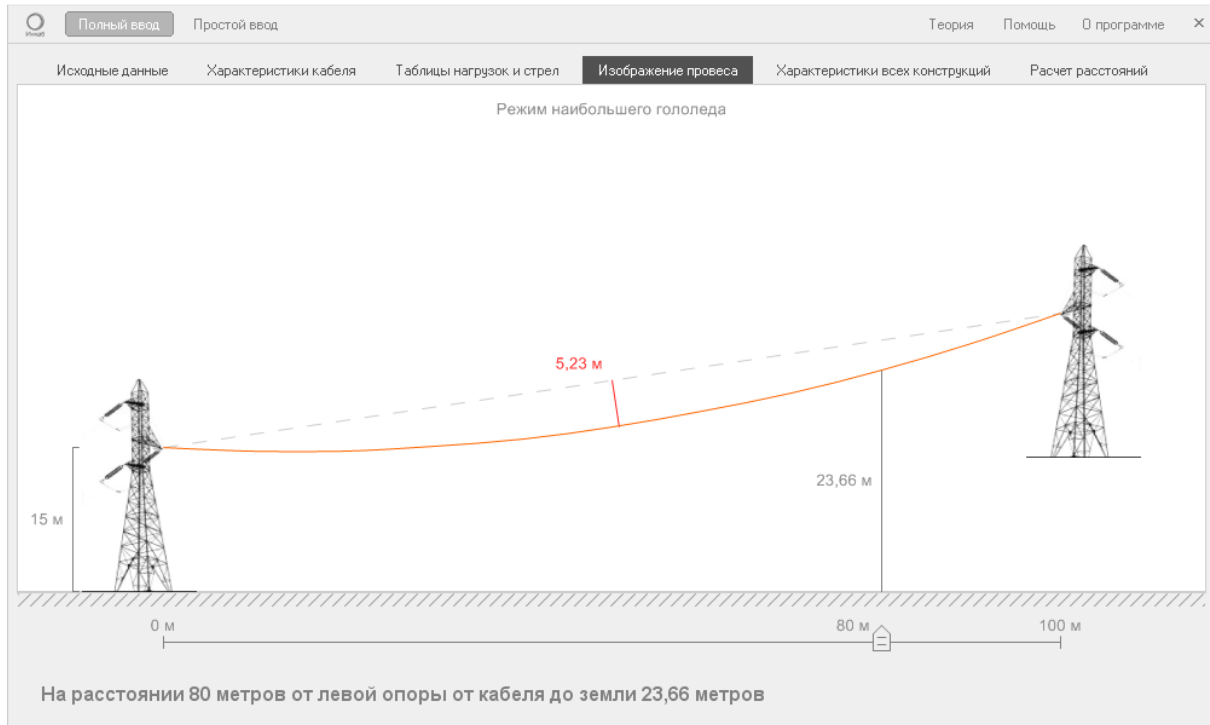
2.3. Вкладка «Изображение провеса».



На данной вкладке отображается рисунок провеса кабеля в пролете с максимальным расстоянием между опорами при режиме наибольшего гололеда.

На данном рисунке отображаются:

- высота опор;
- расстояние от левой опоры до точки с низшей высотой кабеля от земли;
- наименьшая высота от земли до кабеля;
- визируемая стрела провеса при гололеде;



Изменяя параметр расстояния от левой опоры можно определить высоту подвеса кабеля над землей в любой точке между опорами.

2.4. Вкладка «Характеристики всех конструкций».

Исходные данные		Характеристики кабеля												Таблицы нагрузок и стрел				Изображение провеса	Характеристики всех конструкций												Расчет расстояний			
Характеристики кабеля ДПТА-П-16А-2(6)		3,5 кН	6 кН	7 кН	8 кН	10 кН	12 кН	15 кН	18 кН	20 кН	23 кН	25 кН	28 кН	30 кН	40 кН																			
Максимально допустимая растягивающая нагрузка кабеля, кН		3,6	6	7	8,1	10	12,1	15,1	18,1	20	23	25,1	28,1	30,1	40,1																			
Допустимая монтажная растягивающая нагрузка кабеля, кН		0,9	1,5	1,8	2	2,5	3	3,8	4,5	5	5,8	6,3	7	7,5	10																			
МДМРН, кН		2,1	3,6	4,2	4,8	6	7,2	9	10,8	12	13,8	15	16,8	18,1	24																			
Разрывная нагрузка, кН		7	11	13	15	19	23	29	34	38	44	48	53	57	76																			
Масса кабеля, кг		118,8	123,6	125,5	127,6	142,7	146,6	152,4	160	166,1	171,9	178,3	184,1	188	207,1																			
Наружный диаметр кабеля, мм		12,6	12,8	12,8	12,9	13,6	13,8	14	14,5	15	15,2	15,8	16	16,1	16,8																			
Площадь поперечного сечения кабеля, мм ²		124	127,7	129,2	130,8	145,8	148,9	153,3	164,5	177	181,9	195,6	200,8	204,3	221,4																			
Модуль упругости (начальный), кН/мм ²		3,14	5,15	5,91	6,73	7,5	8,84	10,72	11,97	12,32	13,79	13,96	15,23	16,05	19,71																			
Модуль упругости (конечный), кН/мм ²		3,4	5,57	6,38	7,27	8,11	9,55	11,57	12,93	13,31	14,89	15,08	16,45	17,34	21,29																			
Модуль упругости после вытяжки, кН/мм ²		2,2	3,61	4,14	4,71	5,25	6,19	7,5	8,38	8,63	9,65	9,77	10,66	11,24	13,8																			
Минимально допустимый радиус изгиба кабеля, мм		251	255	257	258	273	275	280	290	300	304	316	320	323	336																			
Температурный коэффициент линейного расширения, 1/°C		24,5	13,4	11,2	9,3	7,8	6	4,3	3,2	2,7	2	1,7	1,2	0,9	0																			
Минимальная температура эксплуатации, °C		-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60																			
Максимальная температура эксплуатации, °C		+70	+70	+70	+70	+70	+70	+70	+70	+70	+70	+70	+70	+70	+70																			
Минимально допустимая температура монтажа, °C		-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30																			
Максимально допустимый потенциал электрического поля, кВ		12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12																			

На этой вкладке для всех кН выбранного оптического кабеля отображаются следующие характеристики:

- максимально допустимая растягивающая нагрузка, кН;
- допустимая монтажная растягивающая нагрузка, кН – допускаемая нагрузка при прокатке кабеля через ролики;
- МДМРН – максимально допустимая монтажная растягивающая нагрузка, кН – допускаемая нагрузка при монтаже и выставлении начальных стрел провеса;
- разрывная нагрузка кабеля, кН;
- масса кабеля, кг;
- наружный диаметр кабеля, мм;
- площадь поперечного сечения кабеля, мм²;
- начальный модуль упругости (при первоначальном растяжении), кН/мм²;
- конечный модуль упругости (после предельного нагружения), кН/мм²;
- модуль упругости после вытяжки кабеля, кН/мм²;
- минимальный радиус изгиба кабеля, мм;
- температурный коэффициент линейного расширения, 1/°C;
- минимальная температура эксплуатации, °C;
- максимальная температура эксплуатации, °C;
- минимальная температура монтажа, °C;
- максимальный потенциал электрического поля в точке подвеса кабеля, кВ.

2.5. Вкладка «Расчет расстояний»

На данной вкладке находятся результаты расчета максимально допустимых расстояний между опорами для выбранной марки кабеля и заданных параметрах линии для различных климатических зон (от 1-ой до 6-ой) согласно ПУЭ-6 ред.

Полный ввод Простой ввод Теория Помощь О программе ×

Исходные данные Характеристики кабеля Таблицы нагрузок и стрел Изображение провеса Характеристики всех конструкций **Расчет расстояний**

Соотношение расстояний между опорами и допустимым растягивающим усилием

Кабель ДПТа-П-16А-2(6)

	3,5 кН	6 кН	7 кН	8 кН	10 кН	12 кН	15 кН	18 кН	20 кН	23 кН	25 кН	28 кН	30 кН	40 кН
1 зона	140	230	270	310	350	420	510	590	630	710	750	830	880	1090
2 зона	100	170	190	220	260	300	370	430	470	530	560	620	660	830
3 зона	70	120	140	160	190	220	270	320	350	390	420	460	490	630
4 зона	60	90	100	120	140	170	200	240	260	300	320	350	370	480
5 зона	40	70	80	90	110	130	160	190	200	230	250	270	290	380
6 зона	40	50	60	70	80	100	120	140	160	180	190	210	230	300

**Расчет характеристик линии связи
на основе подвешенного кабеля производства ООО «Инкаб»
по программе «Расчет самонесущих кабелей v.3.2»**

1. Исходные данные.**1.1. Параметры линии.**

Потенциал электрического поля в точке подвеса	
Максимальная длина пролета в линии, м	
Стрела провеса начальная, % от длины пролета	
Начальная нагрузка на кабель	
Перепад высот при максимальной длине пролета, м	
Максимально допустимая стрела провеса при гололеде (вертикальная), м	
Максимально допустимая стрела провеса при ветре (горизонтальная), м	
Максимально допустимая нагрузка кабеля по условиям прочности опор, кН	
Высота подвеса кабеля, м	
Минимальное расстояние кабеля до земли, м	

1.2. Характеристики кабеля

Максимально допустимая растягивающая нагрузка кабеля, кН	
Допустимая монтажная растягивающая нагрузка, кН	
Максимально допустимая монтажная растягивающая нагрузка, кН	
Разрывная нагрузка, кН	
Масса кабеля, кг/км	
Наружный диаметр кабеля, мм	
Площадь поперечного сечения кабеля, мм ²	
Модуль упругости начальный, кН/мм ²	
Модуль упругости конечный, кН/мм ²	
Модуль упругости после вытяжки, кН/мм ²	
Минимально допустимый радиус изгиба кабеля, мм	
Температурный коэффициент линейного расширения, $\cdot 10^{-6}$, 1/°C	
Минимальная температура эксплуатации, °C	
Максимальная температура эксплуатации, °C	
Минимально допустимая температура монтажа, °C	
Максимально допустимый потенциал электрического поля, кВ	

1.3. Климатические условия.

Район	
Климатическая зона по ветру согласно ПУЭ	
Климатическая зона по гололеду согласно ПУЭ	
Максимальная скорость ветра, м/с	
Максимальное ветровое давление, Па	
Стенка льда на кабеле, мм	
Среднеэксплуатационная температура, °C	
Температура монтажа, °C	

2. Расчет стрел провеса и нагрузок при различных климатических условиях.

2.1. Вес кабеля.

Вес кабеля в Н/м рассчитывается исходя из заданной массы кабеля кг/км по следующей формуле:

$$W_{\text{каб}} = \frac{mg}{1000} =$$

Где g – ускорение свободного падения, м/с².

2.2. Растягивающая нагрузка, действующая на кабель.

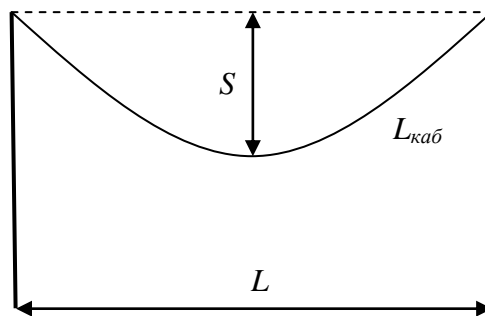
Растягивающая нагрузка, H , действующая на кабель вычисляется следующим образом:

$$H = \frac{WL^2}{8S}$$

где W – линейный вес кабеля, Н/м;

L – расстояние между опорами, м;

S – стрела провеса, м – определяемая как максимальная величина, на которую провисает кабель от горизонтальной линии между точками подвеса кабеля.



Исходя из формулы, видно, что нагрузка на кабель увеличивается с увеличением веса кабеля и расстояния между опорами и уменьшается при увеличении стрелы провеса.

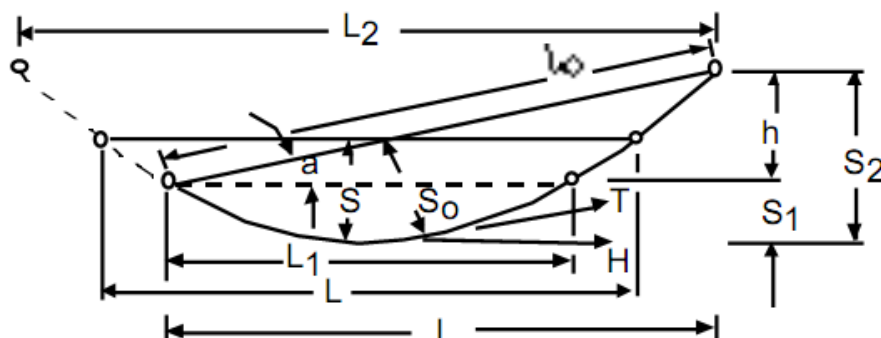
Начальная нагрузка на кабель:

$$H_{\text{нач}} = \frac{WL^2}{8S_{\text{нач}}} =$$

2.3. Перепад высот между опорами.

При разной высоте точек подвеса, кривая провисания кабеля будет несимметричной и низшая точка этой кривой будет находиться не посередине, а ближе к более низкой опоре.

В данном случае, для расчета стрел провеса удобно пользоваться значениями эквивалентных пролетов.



Можно достроить левую ветвь кривой до точки, одинаковой по высоте с правой, и получить симметричную кривую.

Расстояние L_1 называется малым эквивалентным пролетом, а расстояние L_2 – большим эквивалентным пролетом.

Расстояния L_1 и L_2 рассчитываются следующим образом:

$$L_1 = L - \frac{2hH_{нач}}{WL} =$$

$$L_2 = L + \frac{2hH_{нач}}{WL} =$$

Стрелы провеса S_1 и S_2 :

$$S_1 = \frac{WL_1^2}{8H} =$$

$$S_2 = \frac{WL_2^2}{8H} =$$

Где h – перепад высот между точками подвеса кабеля, м.
В случае подвеса кабеля на одном уровне $L_1=L_2=L$ и $S_1=S_2=S$.

2.4. Длина подвешенного кабеля.

Очевидно, что длина подвешенного кабеля больше расстояния между опорами, за счет некоторого провиса кабеля и она, тем больше, чем больше стрела провиса.
Длина подвешенного кабеля рассчитывается следующим образом:

$$L_{каб} = L + \frac{4}{3} \left(\frac{S_1^2}{L_1} + \frac{S_2^2}{L_2} \right) =$$

2.5. Длина кабеля в ненагруженном состоянии:

Для дальнейших расчетов необходимо знать длину кабеля между опорами, как если бы он не находился под действием растягивающих нагрузок ($H = 0$). Данная величина называется длиной кабеля в ненагруженном состоянии, L_{H0} :

$$L_{н0} = \frac{L_{каб}}{1 + \left(\frac{H}{E_{каб} S_{каб}} \right)} =$$

2.6. Длина кабеля в ненагруженном состоянии с учетом температуры:

Дальше необходимо определить длину кабеля в ненагруженном состоянии с учетом температуры кабеля, $L_{нк}$. Под действием температуры кабель может, как удлиняться, так и сжиматься и эта способность определяется температурным коэффициентом линейного расширения кабеля (ТКЛР, $1/^\circ\text{C}$).

$$L_{нк} = L_{н0} [1 + \text{ТКЛР}(T - T_{cp})] =$$

где T – температура кабеля в условиях эксплуатации; T_{cp} – средняя температура эксплуатации.

2.7. Вес кабеля при воздействии максимального гололеда.

В некоторые периоды эксплуатации происходит обледенение оптического кабеля подвешенного между опорами. При этом величина обледенения зависит от географического местоположения подвешенного кабеля и определяется районами гололедности по классификации и картам гололедных районов РФ, согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) – 7 ред.

Гололедная нагрузка действует на кабель вертикально вниз.

Исходя из заданного района гололедности определяют толщину стенки льда на кабеле и рассчитывают вес кабеля в условиях обледенения:

$$W_2 = W + \rho_l g \pi K_i K_d \frac{C(d + C)}{100} =$$

Где ρ_l – объемная масса гололеда (обычно $0,9 \cdot 10^{-3}$), кг/см^3 ;

C – толщина стенки гололеда, мм;

d – диаметр кабеля, мм;

K_i и K_d – коэффициенты учитывающий изменение толщины стенки гололеда по высоте и в зависимости от диаметра провода.

Нормативную толщину стенки гололеда плотностью $0,9 \text{ г/см}^3$ следует принимать в соответствии с картой районирования территории России по толщине стенки гололеда или по региональным картам районирования.

2.8. Ветровая нагрузка на кабель при гололеде.

Также необходимо учитывать, что в процессе эксплуатации на подвешенный оптический кабель действуют ветровые нагрузки и следует рассчитать максимальную нагрузку под воздействием ветра. Для этого, исходя из географического места подвеса кабеля, по классификации и картам районов РФ по максимальной ветровому давлению (или скорости ветра), выбирают необходимое значение.

Ветровая нагрузка действует на кабель в горизонтальном направлении, перпендикулярном его оси.

Ветровая нагрузка (Н/м) рассчитывается следующим образом:

$$W_6 = \alpha_w K_l K_w C_x W(d_{каб} + 2K_i K_d C) \cdot 10^{-3} =$$

где α_w - коэффициент, учитывающий неравномерность ветрового давления по пролету ВЛ
Промежуточные значения α_w определяются линейной интерполяцией;

K_l - коэффициент, учитывающий влияние длины пролета на ветровую нагрузку, равный 1,2 при длине пролета до 50 м, 1,1 - при 100 м, 1,05 - при 150 м, 1,0 - при 250 м и более (промежуточные значения K_l определяются интерполяцией);

K_w - коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте в зависимости от типа местности, определяемый по табл:

C_x - коэффициент лобового сопротивления, принимаемый равным: 1,1 - для кабелей, свободных от гололеда, диаметром 20 мм и более; 1,2 - для всех кабелей, покрытых гололедом, и для всех проводов и тросов, свободных от гололеда, диаметром менее 20 мм;

W - нормативное ветровое давление, Па, в рассматриваемом режиме:

- в режиме максимального ветра: $W = W_0$ - определяется по табл. в зависимости от ветрового района:

- в режиме максимального гололеда:

$W = W_f$ - определяется, следующим образом:

Нормативное ветровое давление при гололеде W_f с повторяемостью 1 раз в 25 лет определяется по скорости ветра при гололеде v_f .

Скорость ветра v_f принимается по региональному районированию ветровых нагрузок при гололеде или определяется по данным наблюдений согласно методическим указаниям по расчету климатических нагрузок. При отсутствии региональных карт и данных наблюдений $W_f = 0,25 W_0$.

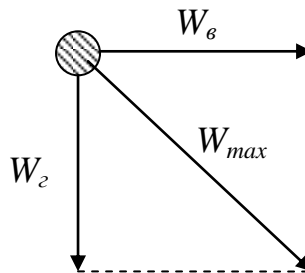
Если в исходных данных известна скорость ветра v_0 , то ветровое давление (Па) определяется следующим образом:

$$W = \frac{v^2}{1,6}$$

2.9. Максимальная нагрузка, действующая на кабель.

Совместное действие вертикальной гололедной нагрузки и горизонтальной ветровой определяет как максимальная нагрузка по следующей формуле:

$$W_{\max} = \sqrt{W_g^2 + W_b^2} =$$



2.10. Расчет максимальной стрела провиса.

2.10.1. Определив максимальную нагрузку, можно узнать длину кабеля в нагруженном состоянии (из п. 2.5. и п. 2.2.):

$$L_{\max} = L_{\text{нк}} \left[1 + \left(\frac{W_{\max} L^2}{8 S_{\max} E_{\text{каб}} S_{\text{каб}}} \right) \right]$$

2.10.2. Эта же величина равна:

$$L_{\max} = L + \frac{4}{3} \left(\frac{S_1^2}{L_1} + \frac{S_2^2}{L_2} \right)$$

2.10.3. Из п.п. 2.2. и 2.4.

$$S_1 = \frac{SL_1^2}{L^2}$$

$$S_2 = \frac{SL_2^2}{L^2}$$

2.10.4. Подставив выражения из 2.10.3. в 2.10.2. получим:

$$L_{\max} = L + \left(\frac{4S^2}{3L^4} \right) (L_1^3 + L_2^3)$$

2.10.5. Из п.2.4 находим:

$$L_1 = L \left(1 - \frac{h}{4S} \right)$$

$$L_2 = L \left(1 + \frac{h}{4S} \right)$$

Тогда:

$$L_1^3 + L_2^3 = L^3 \left(2 + \frac{3h^2}{8S^2} \right)$$

2.10.6. Подставим выражение из п.2.10.5. в выражение из п.2.10.4.:

$$L_{\max} = L + \left(\frac{8S_{\max}^2}{3L} \right) + \left(\frac{h^2}{2L} \right)$$

2.10.7. Приравняем выражения из 2.10.1. и 2.10.6.:

$$L + \left(\frac{8S_{\max}^2}{3L} \right) + \left(\frac{h^2}{2L} \right) - L_{\text{тк}} - \frac{L_{\text{тк}} W_{\max} L^2}{8S_{\max} E_{\text{каб}} S_{\text{каб}}} = 0$$

После преобразования, получим кубическое уравнение следующего вида:

$$S_{\max}^3 + S_{\max} \left(\frac{3L}{8} \right) \left(L + \frac{h^2}{2L} - L_{\text{тк}} \right) - \left(\frac{3L}{8} \right) \left(\frac{L_{\text{тк}} W_{\max} L^2}{8E_{\text{каб}} S_{\text{каб}}} \right) = 0$$

2.10.8. Т. е.:

$$S_{\max}^3 + aS_{\max} + b = 0$$

где:

$$a = \frac{3\left(L^2 + \frac{h^2}{2} - LL_{HK}\right)}{8} =$$

$$b = \frac{-3W_{\max} L^3 L_{HK}}{64E_{\text{каб}} S_{\text{каб}}} =$$

2.10.9. Решив кубическое уравнение можно получить значения максимальной стрелы провиса при наиболее сложных погодных условиях:

Если

$$\left(\frac{a}{3}\right)^3 + \left(\frac{-b}{2}\right)^2 \geq 0$$

то:

$$S_{\max} = \sqrt[3]{\left(\frac{-b}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{a}{3}\right)^3 + \left(\frac{-b}{2}\right)^2}} + \sqrt[3]{\left(\frac{-b}{2}\right) - \sqrt{\left(\frac{a}{3}\right)^3 + \left(\frac{-b}{2}\right)^2}}$$

Если

$$\left(\frac{a}{3}\right)^3 + \left(\frac{-b}{2}\right)^2 < 0$$

то:

$$S_{\max} = 2\sqrt{\frac{-a}{3}} \cos\left\{\left(\frac{1}{3}\right) \cos^{-1}\left[\frac{\left(\frac{-b}{2}\right)}{\left(\frac{-a}{3}\right)^{3/2}}\right]\right\}$$

2.11. Максимальная растягивающая нагрузка при наихудших условиях.

Зная максимальную стрелу провиса кабеля, легко найти (по аналогии с п.2.2.) максимальную растягивающую нагрузку, действующую на кабель, при наихудших погодных условиях:

$$H_{\max} = \frac{W_{\max} L^2}{8S_{\max}} =$$

Эквивалентные пролеты и стрелы провиса при перепаде высот между опорами рассчитываются по аналогии с п.2.3, только вместо начального веса и нагрузки подставляются максимальный вес и максимальная нагрузка:

$$L_{1\max} = L - \frac{2hH_{\max}}{W_{\max} L} =$$

$$L_{2\max} = L + \frac{2hH_{\max}}{W_{\max} L} =$$

$$S_{1\max} = \frac{W_{\max} L_1^2}{8H_{\max}} =$$

$$S_{2\max} = \frac{W_{\max} L_2^2}{8H_{\max}} =$$

2.12. Расчет монтажной стрелы провеса, нагрузки и монтажной таблицы.

По п. 2.6. определяется длина кабеля в ненагруженном состоянии с учетом монтажной температуры:

$$L_{н.монт} = L_{но} [1 + ТКЛР(T_{мон} - T_{ср})]$$

Далее расчет ведется, согласно п.п. 2.10.8, 2.10.9 и 2.11 подставляя соответствующую длину кабеля в ненагруженном состоянии ($L_{н.монт}$), модуль упругости кабеля $E_{каб}$ и вес кабеля W и определяется стрела провеса при соответствующей температуре монтажа ($S_{мон}$) и нагрузка ($H_{мон}$).

Монтажная таблица – монтажные нагрузки и стрелы провиса при различных температурах монтажа исходя из заданной начальной нагрузки.

Расчет монтажной таблицы ведется аналогично расчету максимальной нагрузки и стрел.

Определяется длина кабеля в ненагруженном состоянии при различной температуре:

$$L_{МОН.нк} = L_{но} [1 + ТКЛР(T_{мон} - T_{ср})]$$

где $T_{мон}$ – температура кабеля в условиях эксплуатации; $T_{ср}$ – средняя температура эксплуатации.

Эта длина используется при расчете коэффициентов для определения монтажной стрелы провеса, в качестве веса используется вес кабеля в нормальных условиях:

$$a = \frac{3 \left(L^2 + \frac{h^2}{2} - LL_{МОНнк} \right)}{8}$$

$$b = \frac{-3W_{каб} L^3 L_{МОНнк}}{64E_{каб} S_{каб}}$$

По рассчитанным коэффициентам вычисляется $S_{мон}$ и $H_{мон}$, согласно п.2.10.9 и 2.11.

2.13. Расчет конечной стрелы провеса и нагрузки при нормальных условиях.

После воздействия на кабель максимально тяжелого режима (гололед с ветром), кабель возвращается (сжимается) в нормальное состояние по конечному модулю упругости, т.е. остается остаточное удлинение (см. п.1.7).

Для того чтобы рассчитать конечную стрелу провеса и нагрузку при нормальных условиях необходимо определить длину кабеля при воздействии максимальной нагрузки:

$$L_{каб.к.} = L + \frac{4}{3} \left(\frac{S_{1\max}^2}{L_{1\max}} + \frac{S_{2\max}^2}{L_{2\max}} \right)$$

Далее эта длина приводится к длине кабеля в ненагруженном состоянии по конечному модулю упругости:

$$L_{кк} = L_{к0} = \frac{L_{каб.к.}}{1 + \left(\frac{H_{\max}}{E_{кон} S_{каб}} \right)}$$

Затем по п.п. 2.10.8, 2.10.9 и 2.11 (подставляя W , $L_{кк}$, $E_{кон}$) находим конечную стрелу провеса $S_{н.кон}$ и нагрузку $H_{н.кон}$.

Эквивалентные длины пролетов и стрел провеса (при наличии перепада высот между опорами) определяются согласно п. 2.3., подставляя вес кабеля и рассчитанную нагрузку.

2.13. Расчет стрелы провеса и нагрузки при нормальных условиях после реализации вытяги.

В процессе эксплуатации кабеля при подвесе происходит его вытяжка (см. п.1.8).

Для того, чтобы определить стрелу провеса $S_{н.выт.}$ и нагрузку $H_{н.выт.}$ после вытяжки, необходимо воспользоваться формулами из п.п. 2.10.8, 2.10.9 и 2.11, подставляя в коэффициент b вместо начального модуля упругости, модуль упругости после вытяжки $E_{выт.}$. Вес принимается равным весу кабеля.

Эквивалентные длины пролетов $L_{1н.выт.}$, $L_{2н.выт.}$ и стрел провеса $S_{1н.выт.}$, $S_{2н.выт.}$ (при наличии перепада высот между опорами) определяются согласно п. 2.3., подставляя вес кабеля и рассчитанную нагрузку.

2.14. Расчет стрел провеса и нагрузок при минимальной и максимальной температуре эксплуатации после реализации вытяги.

По п. 2.6. определяется длина кабеля в ненагруженном состоянии с учетом минимальной или максимальной температуры:

$$L_{н \min T} = L_{н0} \left[1 + TKLP(T_{\min} - T_{cp}) \right]$$

$$L_{н \max T} = L_{н0} \left[1 + TKLP(T_{\max} - T_{cp}) \right]$$

Далее расчет ведется, согласно п.п. 2.10.8, 2.10.9 и 2.11 подставляя соответствующую длину кабеля в ненагруженном состоянии ($L_{н \min T}$, $L_{н \max T}$), модуль упругости вытяжки $E_{выт.}$ и вес кабеля W и определяется стрела провеса при соответствующей температуре ($S_{н \min T}$, $S_{н \max T}$) и нагрузки ($H_{н \min T}$, $H_{н \max T}$).

2.15. Расчет стрелы провеса и нагрузки при максимальных условиях (гололед + ветер) после реализации вытяги.

Определяется длина кабеля между опорами по п.2.4. подставляя соответствующие значения эквивалентных пролетов и стрел провеса после вытяжки в нормальных условиях (по п.2.4):

$$L_{каб.выт} = L + \frac{4}{3} \left(\frac{S_{1н.выт}^2}{L_{1н.выт}} + \frac{S_{2н.выт}^2}{L_{2н.выт}} \right)$$

Затем определяется длина кабеля в ненагруженном состоянии (по конечному модулю упругости) по п.2.5.:

$$L_{каб.выт0} = \frac{L_{каб.выт}}{1 + \left(\frac{H_{н.выт.}}{E_{кон} S_{каб}} \right)}$$

С учетом температуры:

$$L_{к.каб.выт} = L_{каб.выто} [1 + ТКЛР(T - T_{cp})]$$

Далее расчет ведется, согласно п.п. 2.10.8, 2.10.9 и 2.11 подставляя соответствующую длину кабеля после вытяжки ($L_{к.каб.выт}$), конечный модуль упругости $E_{кон}$, максимальную нагрузку W_{max} (из п.2.9) и определяется стрела провеса при максимальных нагрузках после вытяжки ($S_{maxвыт}$) и нагрузка ($H_{maxвыт}$).

Эквивалентные длины пролетов $L_{1maxвыт}$, $L_{2maxвыт}$ и стрел провеса $S_{1maxвыт}$, $S_{2maxвыт}$ (при наличии перепада высот между опорами) определяются согласно п. 2.3., подставляя максимальную нагрузку W_{max} и рассчитанную растягивающую нагрузку $H_{maxвыт}$.

2.16. Определение роли вытяжки при расчете максимальных нагрузок.

Если при воздействии максимальных нагрузок на кабель (гололед и ветер), растягивающая нагрузка после реализации вытяжки (по п.2.15) будет больше растягивающей нагрузки на кабель не подвергшийся вытяжке (по п.2.11):

$$H_{maxвыт} > H_{max}$$

то в таком случае **вытяжка является определяющим фактором** и при расчетах необходимо учитывать стрелы провеса и нагрузки, возникающие после реализации вытяжки (по п.2.15).

Если же максимальная растягивающая нагрузка после вытяжки (по п.2.15) меньше максимальной растягивающей нагрузки без учета вытяжки (по п.2.11):

$$H_{maxвыт} < H_{max}$$

то в таком случае **вытяжка НЕ является определяющим фактором** и при расчетах необходимо учитывать стрелы провеса и нагрузки, возникающие после первоначального удлинения кабеля (по п.2.11).

2.17. Расчет стрелы провеса и нагрузки при воздействии максимального гололеда.

Для того, чтобы определить максимальную вертикальную стрелу провеса $S_{max.вер.}$ и нагрузку $H_{max.вер.}$, необходимо воспользоваться формулами из п.п. 2.10.8, 2.10.9 и 2.11, подставляя $L_{к.каб.выт}$ и $E_{кон}$ (если вытяжка – фактор) или $L_{НК}$ и $E_{нач}$ (если вытяжка – не фактор). Вес принимается равным весу кабеля под воздействием гололеда W_e (по п.2.7).

Эквивалентные длины пролетов L_{1e} , L_{2e} и стрел провеса S_{1e} , S_{2e} (при наличии перепада высот между опорами) определяются согласно п. 2.3., подставляя вес кабеля под воздействием льда и рассчитанную нагрузку $H_{max.вер.}$

2.18. Расчет стрелы провеса и нагрузки при воздействии максимальной силы ветра.

Максимальная ветровая нагрузка, действующая на кабель определяется по п.2.8:

$$W_{e\max} = \alpha_w K_l K_w C_x W_0 d_{каб} \cdot 10^{-3}$$

При этом используется максимальное ветровое давление W_0 и диаметр кабеля $d_{каб}$ без воздействия гололеда.

Если максимальная ветровая нагрузка при воздействии гололеда W_e (по п.2.8) больше максимальной ветровой нагрузки без гололеда $W_{e\max}$:

$$W_e > W_{e\max}$$

то тогда для данного режима берется ветровая нагрузка при гололеде:

$$W_{\text{в max}} = W_{\text{в}}$$

Для того, чтобы определить максимальную горизонтальную стрелу провеса $S_{\text{max.гор}}$ и нагрузку $H_{\text{max.гор}}$, необходимо воспользоваться формулами из п.п. 2.10.8, 2.10.9 и 2.11, подставляя $L_{\text{каб.выт}}$ и $E_{\text{кон}}$ (если вытяжка – фактор) или $L_{\text{НК}}$ и $E_{\text{нач}}$ (если вытяжка – не фактор). Вес принимается равным весу кабеля под воздействием максимального ветра $W_{\text{вmax}}$.

Эквивалентные длины пролетов $L_{1в}$, $L_{2в}$ и стрел провеса $S_{1в}$, $S_{2в}$ (при наличии перепада высот между опорами) определяются согласно п. 2.3., подставляя вес кабеля под воздействием ветра $W_{\text{вmax}}$ и рассчитанную нагрузку $H_{\text{max.вер}}$.

2.19. Результаты расчетов по пунктам 2.12—2.18.

Задачи для практических занятий

Задача 1. Рассчитать оптический бюджет магистрального участка, выполненного на стандартном одномодовом волокне на длине волны 1550 нм. Длина участка 20 км, средняя строительная длина кабеля 4 км, используются 4 разъёмных соединения FC/UPC. Оценить требования к приёмопередающей аппаратуре по энергетическому потенциалу.

Задача 2. Для увеличения скорости передачи было предложено перейти на рабочую длину волны 1310 нм вместо 1550 нм. Оценить можно ли использовать старую аппаратуру?

Задача 3. Оценить, насколько изменятся собственные потери в оптическом волокне, если передача сигналов будут осуществляться не во втором, а в третьем окне прозрачности.

Задача 4. Определить, во сколько раз отличается уширение длительности импульсов в стандартном одномодовом волокне при работе на длинах волн 1550 нм и 1310 нм.

Задача 5. Определить, как изменится величина дисперсии сигнала, если заменить лазерный источник, работающий на длине волны 1550 нм на такой же, но работающий на длине волны 1310 нм.

Задача 6. В стандартном оптическом волокне передаются сигналы со скоростью 622 Мбит/с. Длина линии составляет 20 км. Определить, какую максимальную скорость может обеспечить такая линия, если её длину увеличить до 100 км.

Задача 7. Скорость и расстояние передачи по многомодовому оптическому волокну связана с коэффициентом его широкополосности. Что это означает, если коэффициент широкополосности составляет $1000 \text{ МГц} \cdot \text{км}$?

Задача 8. Коэффициент широкополосности оптического волокна равен $1000 \text{ МГц} \cdot \text{км}$. На какое расстояние можно передать сигнал с верхней граничной частотой 200 МГц? 100 МГц ?

Задача №9. Длина волны излучения передатчика 1550 нм при среднем уровне излучения 0дБм. Волоконно-оптическая линия связи состоит из соединенных последовательно

строительных длин кабеля. Потери на одном соединении составляют 0,05 дБ. Дополнительный запас равен 2 дБ, ремонтный запас составляет также 2 дБ. Уровень чувствительности приемника равен -25 дБм. Какова может быть максимальная длина такой линии и сколько в ней будет строительных длин?

Задача №10. Длина волны излучения передатчика составляет 1550 нм, при среднем уровне излучения 0 дБм. Уровень чувствительности приемника равен -25 дБм. При строительстве линии применялось стандартное одномодовое волокно. Запас по потерям составил 4 дБ. Будет ли такая линия работоспособна при длине волны источника излучения 1310 нм?

Задача №11. Длина волны излучения передатчика 1310 нм при среднем уровне излучения 0 дБм. Волоконно-оптическая линия связи состоит из соединенных последовательно строительных длин кабеля. Потери на одном соединении составляют 0,05 дБ. Дополнительный запас равен 2 дБ, ремонтный запас составляет также 2 дБ. Уровень чувствительности приемника равен -25 дБм. Какова максимальная длина такой линии и сколько в ней строительных длин?

Задача №12 Длина волокна 10 км. При длине волны источника излучения 1550 нм затухание в этом волокне составляет 2 дБ. Каковы потери в нем на длине волны 1310 нм?

Задача №13 Суммарная хроматическая дисперсия в конце линии составляет 200 пс. Чему равна длина этой линии при условии, что ширина спектра источника излучения равна 1 нм? 10 нм? Коэффициент дисперсии равен 10 пс/(нм*км).

Задача №14 Длина волокна 10 км. При длине волны источника излучения 1550 нм затухание в этом волокне составляет 2 дБ. Каковы потери в нем на длине волны 1310 нм?