

Д. П. Гиберт, старший преподаватель Пермского государственного технического университета, заместитель генерального директора по техническим вопросам ООО «Инкаб».

В настоящее время все большее внимание уделяется возможности использования подвесных оптических кабелей. Доля самонесущих и с вынесенным силовым элементом оптических кабелей весьма велика. Однако до настоящего времени, практически отсутствует в широком доступе информация, излагающая основы по воздушной прокладке оптических кабелей.

В связи с этим, сильно различаются подходы потребителей при выборе оптимальной конструкции исходя из условий эксплуатации. Как правило, основным определяющим параметром выбора является максимально допустимая растягивающая нагрузка (МДРН) кабеля. В соответствии с собственными методиками, некоторые потребители, осуществляющие монтаж подвесного оптического кабеля, исходя из заданных расстояний между опорами определяют требуемую величину МДРН. Другая часть потребителей учитывает также и другие требования, такие как: стрела провиса, колебания температуры, силу ветра, прочность кабеля при растяжении и др. И также в соответствии с собственными методиками расчета выбирает необходимый оптический кабель. Третья часть потребителей, в качестве определяющего параметра выбирает расстояния между опорами при подвесе оптического кабеля и, исходя из этого, просит изготовителя оптического кабеля подобрать соответствующую конструкцию. Однако следует понимать, что основа правильного выбора оптического кабеля и его дальнейшей надежной работы в течении всего срока эксплуатации должна закладываться при проекте монтажа и учитывать максимально возможное количество параметров, влияющих на кабель. Данная статья ставит целью описать необходимые основы и одну из базовых методик (согласно [2]), позволяющие потребителю выбрать соответствующую своим требованиям конструкцию оптического кабеля.

Для начала необходимо рассмотреть, что подразумевается под максимально допустимой растягивающей нагрузкой.

Как известно, кабель, подвешенный между опорами, подвергается растягивающим нагрузкам, вызванным собственным весом кабеля, ветровым давлением и гололеда. Естественно, что кабель под воздействием этих нагрузок удлиняется. При этом удлинение волокна в кабеле не должно превышать некоторую допустимую величину.

Будем рассматривать оптические кабели со свободной укладкой волокна в оптических модулях скрученных вокруг центрального силового элемента (ЦСЭ). Удлинение такого кабеля приводит к тому, что волокна, расположенные в центре модуля, начинают смещаться к внутренней поверхности модуля у ЦСЭ (рис. 1).

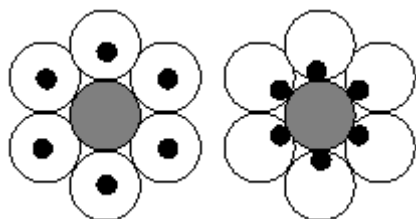


Рис. 1. Расположение волокон в оптическом модуле.

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:

$$\epsilon_{\text{доп}} = \epsilon_{\text{к}} + \epsilon_{\text{изб}} + \epsilon_{\text{ов}}, \quad (1)$$

где, $\epsilon_{\text{доп}}$ — максимально допустимое удлинение кабеля;

$\epsilon_{\text{к}}$ — допустимое удлинение кабеля, при котором волокно не подвергается механическому напряжению;

$\epsilon_{\text{изб}}$ — избыточная длина волокна в модуле;

$\epsilon_{\text{ов}}$ — максимально допустимое удлинение оптического волокна.

Избыточная длина волокна в модуле закладывается при его изготовлении и находится в пределах от 0,05% до 0,2% для разных конструкций и изготовителей оптических кабелей.

Максимально допустимое удлинение оптического волокна определяется исходя зависимости срока службы оптического волокна от приложенной растягивающей нагрузки. В идеале, при максимальных нагрузках на кабель, оптическое волокно вообще не должно подвергаться удлинению. Однако по различным источникам [3, 4], при определенном сроке службы кабеля в 25 лет, допускается удлинение волокна на величину от 0,2 до 0,36% 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 [3]:

$$\epsilon_{\text{к}} = -1 + \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 R^2}{S^2} \left(2 \frac{\Delta R}{R} - \frac{\Delta R^2}{R^2} \right)}, \quad (2)$$

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.

При растяжении кабеля необходимо учитывать также приведенный модуль упругости кабеля, $E_{каб}$. Как известно, оптический кабель состоит из различных материалов, при этом определяющее значение на модуль упругости целого кабеля оказывают центральный силовой элемент, упрочняющие нити в случае самоподвесного кабеля и вынесенный трос в случае кабеля в виде «восьмерки».

Для расчета приведенного модуля упругости кабеля, необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$E_{каб} = \frac{\sum_{i=1}^m E_i S_i}{\sum_{i=1}^m S_i}, \quad (3)$$

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

Понятно, что приведенный модуль упругости кабеля также зависит от числа и вида силовых элементов и определяется изготовителем кабеля. Однако модуль упругости кабеля является важной характеристикой для расчета нагрузок на подвесные кабели и должен указываться изготовителем оптического кабеля в перечне механических характеристик.

Сечение оптического кабеля (или троса для кабеля в виде «восьмерки») также может быть вычислено исходя из указанного изготовителем диаметра кабеля (или троса).

Таким образом, максимально допустимую растягивающую нагрузку можно вычислить по следующей формуле:

$$MДРН = E_{каб} S_{каб} \epsilon_{доп}, \quad (4)$$

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.

Теперь перейдем к расчету максимальной нагрузки при эксплуатации кабеля, исходя из заданных начальных условий.

Для начала необходимо рассмотреть основные используемые при расчете формулы. Растягивающая нагрузка, H , действующая на кабель вычисляется следующим образом:

$$H = \frac{WL^2}{8S}, \quad (5)$$

где W — линейный вес кабеля, Н/м;

L — расстояние между опорами, м;

S — стрела провиса, м — определяемая как максимальная величина, на которую провисает кабель от горизонтальной линии между точками подвеса кабеля (рис. 2).

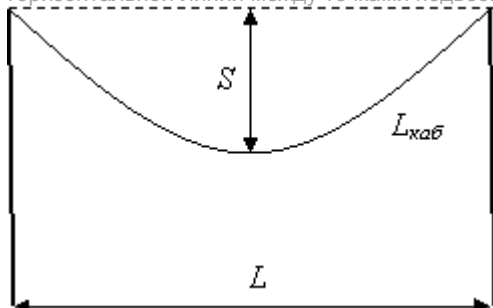


Рис. 2. Схема подвеса кабеля между опорами с обозначениями.

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

Длина подвешенного кабеля между опорами вычисляется по следующей формуле:

$$L_{каб} = L + \frac{8S^2}{3L}, \quad (6)$$

Естественно, что длина кабеля будет больше, чем расстояние между опорами за счет некоторого провиса кабеля и

она, тем больше, чем больше стрела провиса.

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} :

$$L_{H0} = \frac{L_{H2F}}{1 + \left(\frac{H}{E_{H2F} S_{H2F}} \right)}, \quad (7)$$

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

$$L_{Hk} = L_{H0} [1 + \text{ТКЛР}(T - 20)], \quad (8)$$

где T — температура кабеля в условиях эксплуатации;

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. Исходя из заданного района гололедности определяют толщину стенки льда на кабеле и рассчитывают вес кабеля в условиях обледенения [1]:

$$W_e = W + \rho_l \pi C(d + C), \quad (9)$$

где ρ_l — объемная масса гололеда (обычно $0,9 \cdot 10^{-3}$);

C — толщина стенки гололеда;

d — диаметр кабеля.

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 скорости ветра, выбирают необходимое значение. Обычно значение максимальной скорости ветра находится в пределах от 15 до 45 м/с.

Ветровая нагрузка на кабель при гололеде (максимально тяжелые условия эксплуатации) определяется по следующей формуле [1]:

$$W_e = 1,2a \frac{V^2}{16} (d + 2C), \quad (10)$$

где a — коэффициент, учитывающий неравномерность действия ветра по длине пролета ($a = 1$ при V до 20 м/с; $a = 0,85$ при V до 25 м/с; $a = 0,75$ при $V < 30$ м/с; $a = 0,7$ при $V > 30$ м/с); V — скорость ветра, м/с.

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

$$W_{\max} = \sqrt{W_e^2 + W_s^2}, \quad (11)$$

Определив максимальную нагрузку, можно узнать длину кабеля в нагруженном состоянии по (7) с учетом (5):

$$L_{\max} = L_{Hk} \left[1 + \left(\frac{W_{\max} L^2}{8 S_{\max} E_{H2F} S_{H2F}} \right) \right], \quad (12)$$

По формуле (6) эта же величина равна:

$$L_{\max} = L + \frac{8 S_{\max}^2}{3 L}, \quad (13)$$

Таким образом, приравняв эти выражения, получим кубическое уравнение, следующего вида:

$$S_{\max}^3 + S_{\max} \left(\frac{3L}{8} \right) (L - L_{Hk}) - \left(\frac{3L}{8} \right) \left(\frac{L_{Hk} W_{\max} L^2}{8 E_{H2F} S_{H2F}} \right) = 0, \quad (14)$$

Т.е.:

$$S_{\max}^3 + a S_{\max} + b = 0, \quad (15)$$

где:

$$a = \frac{3(L^2 - L L_{Hk})}{8}, \quad b = \frac{-3 W_{\max} L^3 L_{Hk}}{64 E_{H2F} S_{H2F}}, \quad (16)$$

Решив кубическое уравнение, можно получить значения максимальной стрелы провиса при наиболее сложных

погодных условиях. Если $\left(\frac{a}{3}\right)^3 + \left(\frac{-b}{2}\right)^2 \geq 0$, (18)

$$S_{\max} = \sqrt[3]{\left(\frac{-b}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{a}{3}\right)^3 + \left(\frac{-b}{2}\right)^2}} + \sqrt[3]{\left(\frac{-b}{2}\right) - \sqrt{\left(\frac{a}{3}\right)^3 + \left(\frac{-b}{2}\right)^2}}, \quad \left(\frac{a}{3}\right)^3 + \left(\frac{-b}{2}\right)^2 < 0$$

то: (19) Если

$$S_{\max} = 2\sqrt{\frac{-a}{3}} \cos\left\{\left(\frac{1}{3}\right) \cos^{-1}\left[\frac{\left(\frac{-b}{2}\right)}{\left(\frac{-a}{3}\right)^{3/2}}\right]\right\}, \quad (21)$$

(20) то:

Необходимо отметить, что в случае, если максимальная стрела провиса превысит допустимую для данных условий, то необходимо задаться другой (меньшей) начальной стрелой провиса.

Зная максимальную стрелу провиса кабеля, легко найти по (5) максимальную растягивающую нагрузку, действующую на кабель, при наихудших погодных условиях:

$$H_{\max} = \frac{W_{\max} L^2}{8S_{\max}}, \quad (22)$$

Таким образом, рассчитав максимальную нагрузку, необходимо выбрать оптический кабель с большим значением МДРН, т.е. исходя из условия:

$$MДРН > H_{\max}, \quad (23)$$

Рассмотрим небольшой пример: Пусть необходимо выбрать самонесущий оптический кабель для подвеса между опорами на расстояние 150 м, со стрелой провиса 1% (2 м). При этом район гололедности — 3 (толщина стенки льда — 15 мм), максимальная сила ветра — 30 м/с.

Выберем сначала кабель с МДРН в 8 кН и следующими характеристиками: диаметр — 12,7 мм; масса — 126 кг/км; КТЛР — 4,70 1/°С; модуль упругости — 7,74 кН/мм². Получим, что максимальная нагрузка воздействующая на кабель при неблагоприятных погодных условиях равна 9,06 кН, что больше МДРН и кабель не подходит.

Поэтому выберем кабель с МДРН в 10 кН и следующими характеристиками: диаметр — 12,9 мм; масса — 131 кг/км; КТЛР — 3,49 1/°С; модуль упругости — 9,55 кН/мм². Получаем, что $H_{\max} = 9,81$ кН, что меньше МДРН и кабель удовлетворяет заданным условиям.

Следует отметить, что если уменьшить стрелу провиса до 0,5% (1 м), то нагрузка $H_{\max} = 10,97$ кН и необходимо выбирать кабель с большим значением МДРН. Рассмотрим влияние различных факторов на величину максимальной нагрузки для одного и того же кабеля с МДРН = 10 кН.

Влияние расстояния между опорами на величину нагрузки показано на рис. 3.

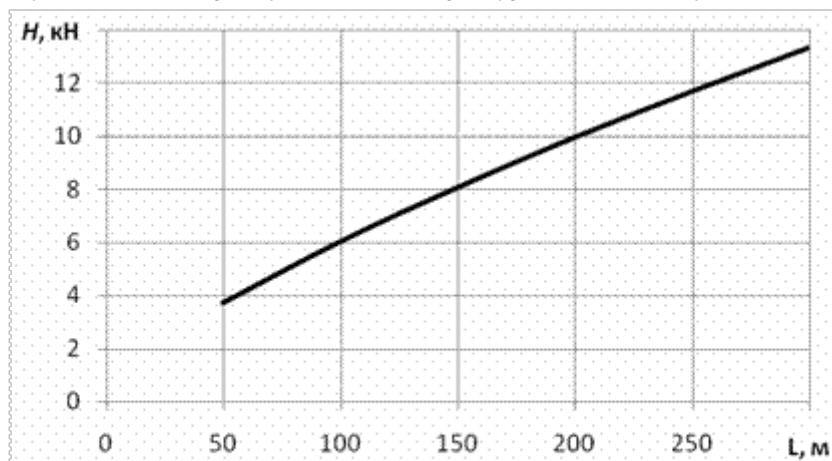
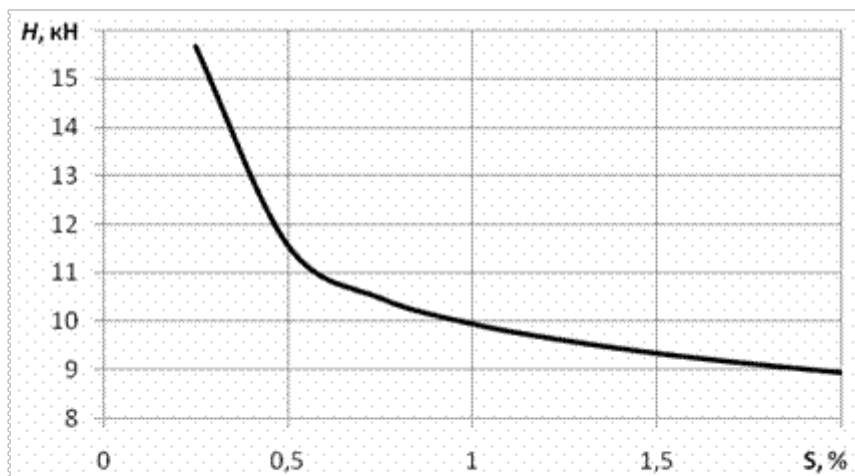


Рис. 3. Зависимость нагрузки от расстояния между опорами.



Влияние стрелы провиса на величину нагрузки показано на рис. 4.
Рис. 4. Зависимость нагрузки от начальной стрелы провиса.

На данном графике хорошо заметно, что если «перетянуть» кабель в процессе монтажа, то очень легко превысить МДРН даже при благоприятных погодных условиях и кабель довольно быстро выйдет из строя. Влияние толщины стенки льда при гололеде показано на рис. 5.

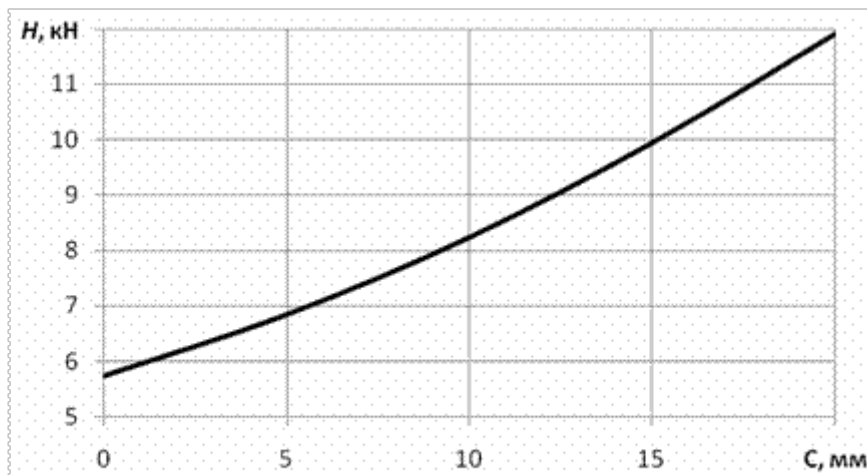


Рис. 5. Зависимость нагрузки от толщины стенки льда при гололеде.
Влияние максимальной силы ветра при гололеде показано на рис. 6.

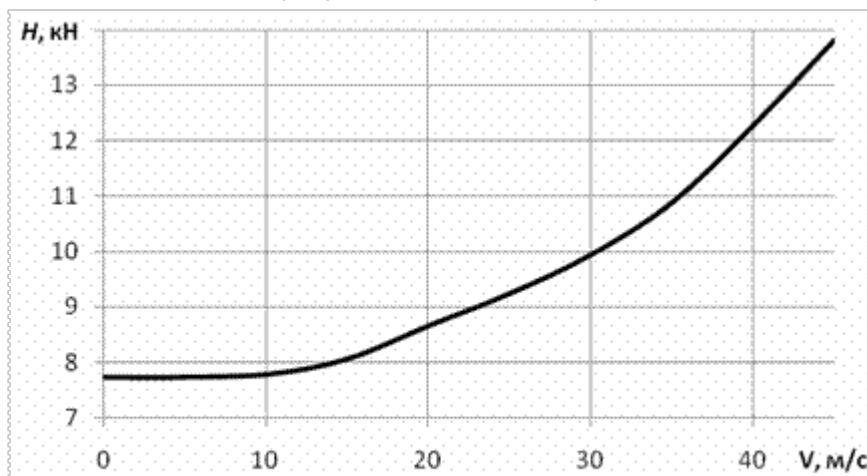


Рис. 6. Зависимость нагрузки от максимальной силы ветра при гололеде.

В безветренную погоду и при отсутствии гололеда при заданных исходных условиях нагрузка на кабель будет составлять «всего» 3,18 кН, т.е. тяжение кабеля при монтаже (без учета вытяжки) составит около 320 кг, обеспечив стрелу провиса в 2 м на расстоянии между опорами в 200 м.

Показанные зависимости ярко иллюстрируют, что оптимальный выбор подвесного кабеля зависит не только от расстояния между опорами, но и в значительной степени от выбранной стрелы провиса кабеля между опорами, а также географического места монтажа кабеля с заранее определенными наилучшими погодными условиями.

Изготовители кабеля могут обеспечивать лишь соответствие заявленным механическим характеристикам, а в частности МДРН. А параметры подвеса, в частности расстояния между опорами, задаются и рассчитываются непосредственными потребителями оптического кабеля исходя из конкретных условий местности и прочих факторов. Однако, конечно, при наличии всех исходных данных для монтажа, изготовитель обеспечивает консультационную поддержку потребителя, с целью обеспечения надежной и бесперебойной работы оптического кабеля в течении всего срока эксплуатации.

Список литературы:

1. Ларин Ю. Т. Оптические кабели: методы расчета конструкций. Материалы. Надежность и стойкость к ионизирующему излучению. — М.: Престиж, 2006. — 304 с.: ил.
2. Times Fiber Communications, INC.® Technical Note/1006-A. Mechanics Of Aerial CATV Plant. September, 1995.
3. Бондаренко О. В., Иоргачев Д. В., Мурадян Л. Л. Выбор конструкции самонесущего оптического кабеля по растягивающим нагрузкам. — Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2001, № 1.
4. Семёнов С. Л. Физические процессы, определяющие прочность и долговечность волоконных световодов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 1997 г.