

# Расчёт усилий тяжения кабеля

Иван ПУФАЛЬ

Последнее время в России в значительной степени увеличилось количество кабельных линий. При этом растёт не только их количество, но и качественные характеристики также улучшаются. Уже не редкость ГНБ-переходы (переходы горизонтально-направленного бурения) протяжённостью 600—800 м и более. Длина прокладки единой строительной длины достигает примерно нескольких километров. При проектировании столь протяжённых объектов возникает необходимость определения усилий, возникающих в кабеле, так как именно эти усилия могут оказаться узким местом и будет необходимо делить строительные длины или искать иное техническое решение (в случае больших ГНБ-переходов). Как правило, в рекомендациях по прокладке кабельных линий различных заводов-изготовителей приводится методика расчёта усилий, возникающих в кабеле, и накладываются ограничения по этим нагрузкам. Зачастую эти рекомендации носят неточный характер, с рядом упрощений.

Для протяжки кабеля используют следующие методы:

- *протяжка с помощью лебёдки (Pulling)*. Данный метод самый распространённый и используется как при роликовой прокладке, так и при прокладке в трубе;
- *заталкивание кабеля при помощи кабельных толкателей (Pushing)*. Данная технология применяется самостоятельно на сравнительно коротких участках трассы или (что наиболее часто встречается) используется в комплексе с другими технологиями. Кабельные толкатели можно размещать как в начале трассы, так и на любом её участке. Причём количество толкателей не ограничено, хотя большое их количество приводит к чрезвычайно сложной координации прокладки, поэтому число точек, где размещают кабельные толкатели, обычно ограничено. Но также возможно в одной точке устройство из нескольких последовательно включённых кабельных толкателей. Как правило, один толкатель развивает усилие до 6 кН;
- *технология, в основе которой лежит эффект плавания или плавания (Floating)*. За основу этого метода принято действие закона Архимеда. Спо-

соб применим только к прокладке в трубах. Они обычно заполняются водой при использовании силовых кабелей. Эта технология является вспомогательной и, по сути, просто снижает вес кабеля;

- *задувка кабеля (Jetting)*. Способ применим только к прокладке в трубах. Наибольшее распространение технология нашла в строительстве волоконно-оптических сетей связи. В качестве движущей силы используется струя сжатого воздуха или напор воды (гидрозадувка).

Так же возможны различные комбинации этих технологий. В частности, известна технология под фирменным названием Watucab, совмещающая в себе сразу три технологии: толкание — плавание — гидрозадувку.

В настоящей статье предлагается общая методика расчёта усилий тяжения.

## МЕТОДИКА РАСЧЁТА

Используемые символы:

$T_o$  — начальное тяжение на участке, Н;

$T$  — конечное тяжение на участке, Н;

$M$  — масса кабеля, кг;

$W$  — вес кабеля, Н;

$G$  — гравитационное ускорение, 9,81 м/с<sup>2</sup>

$W_{ef}$  — эффективный вес кабеля, Н;

$\rho$  — плотность воды, 1000 кг/м<sup>3</sup>;

$D$  — диаметр кабеля, м;

$L$  — длина участка, м;

$R$  — радиус поворота, м;

$\theta$  — угол повтора, град.;

$\mu_{баз}$  — коэффициент трения (табл.);

$\mu$  — эффективный коэффициент трения;

$n$  — число роликов (вертикальных — на горизонтальных поворотах или горизонтальных — на вертикальных поворотах) в расчёте в среднем на 1 м поворота трассы;

$Z$  — радиальная сила, Н/м;

$W_c$  — коэффициент веса;

$D_B$  — внутренний диаметр трубы, м;

$D_H$  — наружный диаметр трубы, м;

SDR — (Standart Dimension Ratio) — стандартное размерное отношение трубы, которое можно представить в виде отношения номинального наружного диаметра трубы к номинальной толщине стенки тру-

бы. Для полимерных труб приняты следующие значения: SDR 41; 33; 26; 21; 17,6; 17; 13,6; 11; 9; 7,4; 6.

**КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ**  
**Табл. Коэффициенты трения**

Материал	Материал	Со смазкой	Без смазки
XLPE (оболочка обычного кабеля)	PE (полиэтилен)	0,25, вода	0,45
		0,15, жидкое мыло	
		0,1, специальная смазка	
XLPE (оболочка обычного кабеля)	Цементные трубы (асбестовые)	0,4	0,6
XLPE (оболочка обычного кабеля)	ролики	—	0,15
PE (полиэтилен)	цемент	—	0,35
PE (полиэтилен)	бетон	—	0,70
PE (полиэтилен)	песок	—	0,25

**Примечание.** Трубы ProtectorFlex имеют шероховатость поверхности 0,004, в то время как у полиэтиленовых труб — 0,015, то есть имеют меньший коэффициент трения, чем принятый для полиэтиленовых труб.

**КОЭФФИЦИЕНТ ВЕСА**

При различных конфигурациях затяжки кабелей в трубы необходимо учитывать вектор реакции опоры на коэффициент трения.

При затягивании одного кабеля в трубу коэффициент веса  $W_c = 1$ .

При затягивании двух или трёх кабелей, уложенных треугольником в одну трубу, коэффициент веса определяется:

$$W_c = 1 / [\sqrt{1 - \{D/(D_b - D)\}^2}]$$

При этом внутренний диаметр трубы можно определять по формуле:

$$D_b = D_H - 2(D_H/SDR)$$

При затягивании трёх кабелей, распределённых по трубе, коэффициент веса определяется:

$$W_c = 1 + 4/3[D/(D_b - D)]^2$$

При затягивании четырёх кабелей, уложенных ромбом в одной трубе, коэффициент веса определяется по формуле:

$$W_c = 1 + 2[D/(D_b - D)]^2$$

Эффективный коэффициент трения определяется по следующей формуле:

$$\mu = \mu_{\text{баз}} \cdot W_c$$

Максимально допустимое тяжение кабеля определяет завод-изготовитель, но обычно эта величина рассчитывается как произведение сечения жилы в мм<sup>2</sup> на 50 Н/мм<sup>2</sup> для медных жил и 30 Н/мм<sup>2</sup> — для алюминиевых. К примеру, кабель ПвПу2г 1000/95

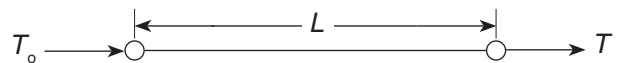
имеет допустимое тяжение не более 50 000 Н. Ряд производителей при изготовлении кабелей применяют различные виды уплотнения жилы и могут обеспечивать большие усилия тяжения, которые можно рассчитать по этим формулам на 25—30%.

Вес кабеля  $W = M \cdot g$ .

Эффективный вес кабеля, учитывающий силу выталкивания при протяжке в воде, равен:

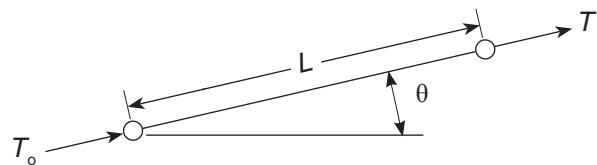
$$W_{\text{ef}} = M \cdot g - (\pi/4)\rho \cdot g \cdot D^2$$

Усилие тяжения на прямом участке:



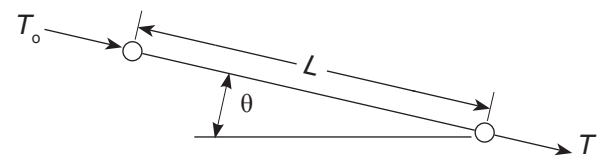
$T = T_0 + \mu WL$ , где под  $W$  имеется ввиду либо вес кабеля, либо эффективный вес кабеля при протяжке в трубе, заполненной водой.

Усилие тяжения при подъёме кабеля:



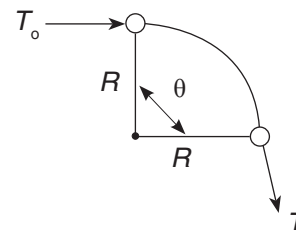
$$T = T_0 + WL(\sin\theta + \mu\cos\theta)$$

Усилие тяжения при спуске кабеля:



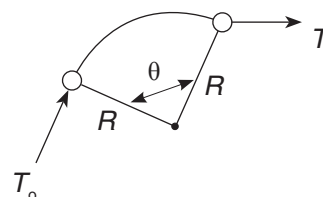
$$T = T_0 - WL(\sin\theta - \mu\cos\theta)$$

Усилие тяжения при горизонтальном повороте кабеля:



$$T = T_0 \cosh(\mu\theta) + \sqrt{T_0^2 + (WR)^2} \sinh(\mu\theta)$$

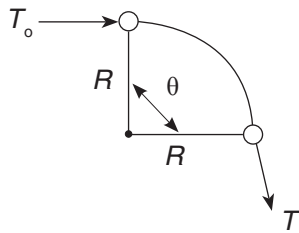
Усилие тяжения при выпуклом движении вверх:



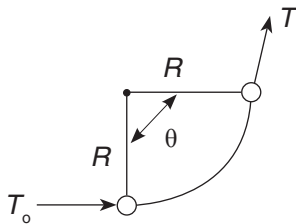
$$T = T_0 e^{\mu\theta} + WR/(1+\mu^2)[2\mu e^{\mu\theta} \sin\theta + (1 - \mu^2)(1 - e^{\mu\theta} \cos\theta)]$$

Усилие тяжения при выпуклом движении вниз:

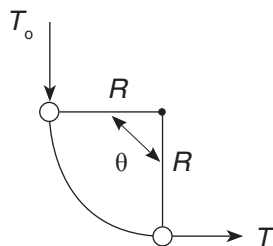
# КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ



$T = T_0 e^{\mu\theta} + WR/(1+\mu^2)[2\mu\sin\theta - (1-\mu^2)(e^{\mu\theta} - \cos\theta)]$ .  
Усилие тяжения при вогнутом движении вверх:



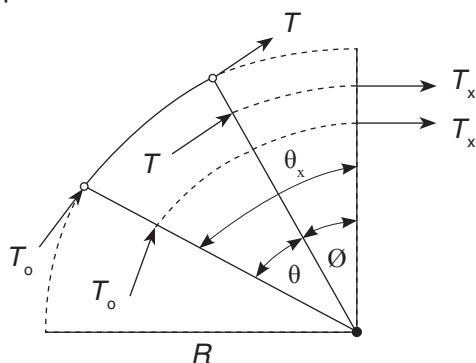
$T = T_0 e^{\mu\theta} - WR/(1+\mu^2)[2\mu\sin\theta - (1-\mu^2)(e^{\mu\theta} - \cos\theta)]$ .  
Усилие тяжения при вогнутом движении вниз:



$T = T_0 e^{\mu\theta_x} - WR/(1+\mu^2)[2\mu e^{\mu\theta_x} \sin\theta + (1-\mu^2)(1 - e^{\mu\theta} \cos\theta)]$ .

В случае если угол  $\theta$  смещён от вертикальной оси на некоторый угол  $\varnothing$ , то расчёт необходимо вести по совмещённым формулам.

На примере усилия тяжения при выпуклом движении вверх имеем:



$\theta_x = \theta + \varnothing;$

$T_x = T_0 e^{\mu\theta_x} + WR/(1+\mu^2)[2\mu e^{\mu\theta_x} \sin\theta_x + (1-\mu^2)(1 - e^{\mu\theta_x} \cos\theta_x)];$   
 $T = \{T_x - [WR/(1+\mu^2)][2\mu e^{\mu\theta} \sin\theta + (1-\mu^2)(1 - e^{\mu\theta} \cos\theta)]\}/e^{\mu\theta}$ .

## РАДИАЛЬНАЯ НАГРУЗКА

При затягивании одного кабеля в трубу:  $Z = T/R$ .

При затягивании двух или трёх кабелей, уложенных треугольником, в одну трубу:  $Z = W_c \cdot T/2R$ .

При затягивании трёх кабелей, распределённых по трубе, нагрузка определяется по формуле:

$Z = [(3W_c - 2) \cdot T]/3R$ .

При затягивании четырёх кабелей, уложенных ромбом в одной трубе, радиальная нагрузка определяется по формуле:  $Z = [(W_c - 1) \cdot T]/R$ .

Радиальная нагрузка, возникающая на одном ролик на повороте трассы, определяется из соотношения:  $Z = [e^{\pi\mu(9/180)} \cdot T]/nR$ .

Максимально допустимые радиальные нагрузки на кабель следующие:

- на 1 ролик на 1 метр:  $Z = 1500$  Н/м;
- при тяжении в трубопроводах:  $Z = 10000$  Н/м.

Для оптимального выбора условий протяжки кабеля необходимо выполнить два расчёта для каждого участка: в прямом и обратном направлении.

## ЗАТЯЖКА ТРУБ В ПРОКОЛ ГНБ

При затягивании защитных труб в прокол ГНБ возникает необходимость удостовериться в том, что усилия тяжения, возникающие при затяжке труб, не превысят допустимого уровня. Для определения усилий тяжения предлагается использовать методику, аналогичную расчёту усилий тяжения кабеля, при этом заменяя значение  $D_H$  на диаметр наибольшего расширителя, по которому осуществляется проходка прокола. При этом данная методика служит для ориентировочного определения усилий тяжения.

Уровень допустимых усилий тяжения предлагается определять исходя из предела текучести материала, из которого изготовлены трубы.  $\sigma$  — предел текучести, МПа.

Допустимое удельное усилие тяжения равно:

$R_{уд} = 1/2 \sigma$ .

Для ПЭ 80  $\sigma = 16,7$  МПа,  $R_{уд} = 8,35$  Н/мм<sup>2</sup>.

Для ПЭ 100  $\sigma = 21$  МПа,  $R_{уд} = 10,5$  Н/мм<sup>2</sup>.

Для труб ProTector Flex  $\sigma = 20,5$  МПа,  $R_{уд} = 10,25$  Н/мм<sup>2</sup>.

Площадь трубы определяется по формуле:

$S = \pi/4(D_H^2 - D_B^2) = \pi/4[D_H^2 - (D_H - 2 \cdot \{D_H/SDR\})^2] = \pi [\{D_H^2/SDR\} - \{D_H^2/SDR^2\}]$ .

Допустимое сопротивление плети труб равно:

$T_{доп} = \sum S \cdot R_{уд} \cdot k_{пл}$ ,

где  $k_{пл}$  — рекомендуемый коэффициент запаса при протяжке плети труб. Для плети из трёх труб —  $k_{пл} = 0,95$ .

Для плети из четырёх труб —  $k_{пл} = 0,90$ .

Для плети из пяти труб —  $k_{пл} = 0,85$ .

Для плети из шести и более труб —  $k_{пл} = 0,80$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Standard Ausgrid. NS130 Specification for Laying Underground Cables up to and Including 11 kV, October 2013.
2. W. Griffioen, G. Plumettaz, H.G. Nobach. Theory, software, testing and practice of cable in duct installation, IWCS, 2006.