

В журнале («Новости ЭлектроТехники» № 4(82) 2013, www.news.elteh.ru) была опубликована статья [1] о методике теплового расчета кабельных линий, определении длительно допустимого тока в жиле кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена, а также об особенностях прокладки кабелей в полимерных трубах. В новом материале Михаил Викторович Дмитриев продолжает исследовать влияние прокладки кабелей в трубах на пропускную способность линий.

КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ, ПРОЛОЖЕННЫЕ В ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБАХ

Пропускная способность



Михаил Дмитриев,
к.т.н, доцент,
Санкт-Петербургский
Политехнический университет
Петра Великого

Прокладка кабельных линий (КЛ) в полимерных трубах – современный высокотехнологичный способ строительства электрических сетей, имеющий преимущества перед прокладкой КЛ в открытом грунте или в железобетонных лотках: малый объем земляных работ и высокую скорость строительства.

В [1], после ряда упрощений, были предложены формулы, по которым можно оценить пропускную способность кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). В частности, было показано, что в номинальном режиме работы при температуре жилы кабеля 90 °С, допустимой для СПЭ-изоляции, температура оболочки кабеля может достигать 75–85 °С, и, следовательно, при строительстве КЛ нельзя использовать трубы холодного водоснабжения, выполняемые из полиэтилена низкого давления (ПНД) и рассчитанные на температуру не более 40 °С.

Моделирование, проведенное с использованием специализированных компьютерных программ, таких как ELCUT или COMSOL, подтвердило сделанный в [1] вывод: конкретное значение температуры оболочки кабеля зависит от условий прокладки КЛ, но в среднем составляет около 80 °С.

Несмотря на опубликованные результаты исследований, полученные разными способами и разными научными коллективами [2], до сих пор встречаются инженеры-практики, которые уверены, что при температуре жилы кабеля 90 °С температура оболочки не превышает 40 °С, и применение ПНД труб совершенно оправдано. Однако сейчас выполнение теплового расчета стало настолько доступным, что любой может самостоятельно убедиться в том, какая на самом деле у кабеля температура оболочки, и удобный инструмент для этого – легко проверяемые упрощенные формулы из [1].

Помимо высокой температуры оболочки и недопустимости применения ПНД труб, с помощью методики [1] также можно сделать вывод: применение при проектировании поправочного коэффициента 0,9 на прокладку кабелей в трубах в общем случае является неверным.

Считается, что кабели, проложенные в трубах, имеют низкую пропускную способность (допустимый ток в жиле) в сравнении с прокладкой в открытом грунте, и связано это с плохой теплопроводностью заполняющего трубу воздуха. Покажем, что при определенных условиях прокладка в трубе не снижает, а, напротив, даже повышает допустимый для КЛ ток.

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ПО [1]

На рис. 1 схематично показана конструкция силового однофазного кабеля и один из способов его прокладки – в полимерной трубе, размещенной в грунте. При проведении оценочных расчетов допустимо считать, что кабель расположен в средней части трубы (на самом деле кабель всегда располагается на дне трубы).

Тепловой расчет кабеля основан на решении уравнения теплового баланса – выделяющаяся в кабеле активная мощность потерь переходит в тепло, которое через изоляцию (И) кабеля, оболочку (О), воздух (В) в трубе и саму трубу (Т) уходит в окружающий грунт (Г), встречая на своем пути тепловое сопротивление этих слоев: $R_{И}, R_{О}, R_{В}, R_{Т}, R_{Г}$.

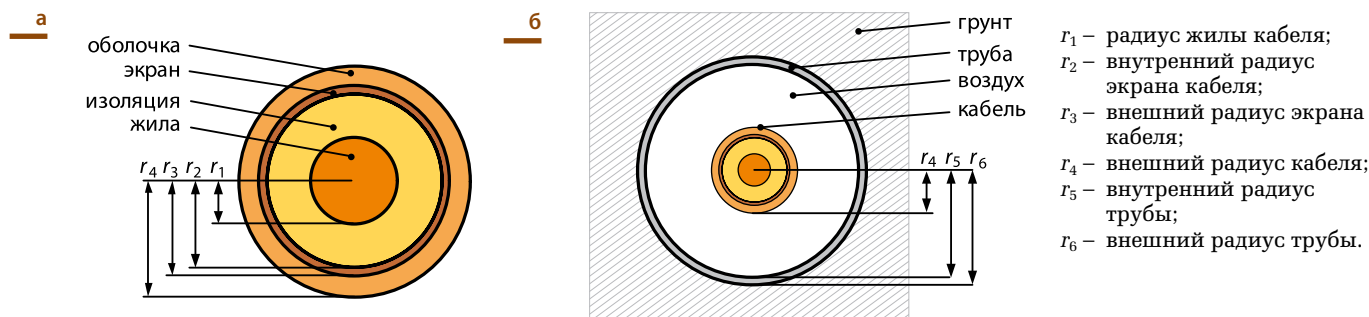
При рассмотрении этого уравнения и его составляющих полагаем, что тепло отводится от кабеля только в радиальном направлении, а отвода тепла вдоль оси кабеля и трубы, в которой он проложен, не происходит (такой отвод был бы возможен только для очень короткой трубы).

В трехфазных сетях прокладывают трехфазные группы однофазных кабелей, что для каждой из фаз ухудшает условия отвода тепла в грунт. Это можно учесть, считая для каждой из фаз тепловое сопротивление грунта в три раза большим, чем оно было бы при наличии только одной фазы кабеля (рис. 2).

Для изоляции из сшитого полиэтилена, которая наиболее часто применяется для современных однофазных кабелей 6–500 кВ, в нормальном режиме работы температура не должна превосходить 90 °С. Приняв температуру жилы

• Рис. 1. Силовой однофазный кабель, проложенный в полиэтиленовой трубе в грунте

- а) конструкция и параметры кабеля;
б) способ прокладки и параметры трубы



$T_{ж} = 90^{\circ}\text{C}$, из уравнения теплового баланса найдем длительно допустимый ток кабеля (формула (3) из [1]):

$$I_{\text{дл90}} = \sqrt{\frac{T_{ж} - T_{г} - P_{и} \cdot (0,5R_{и} + R_{о} + R_{в} + R_{т} + 3R_{г})}{K_{п}R_{ж}(P_{и} + R_{о} + R_{в} + R_{т} + 3R_{г}) + R_{ж}(P_{э}/P_{ж}) \cdot (R_{о} + R_{в} + R_{т} + 3R_{г})}}$$

где $T_{г}$ – температура грунта;

$P_{и}$ – диэлектрические потери в изоляции кабеля;

$K_{п}$ – коэффициент, учитывающий рост потерь в жиле кабеля за счет поверхностного эффекта;

$R_{ж}$ – активное сопротивление жилы;

$P_{э}/P_{ж}$ – отношение, которые характеризует роль «паразитных» потерь в экранах кабеля на фоне «неизбежных» потерь в жилах.

Известно, что $P_{э}/P_{ж} = 0,1-3,0$ при простом заземлении экранов с двух сторон кабеля и $P_{э}/P_{ж} = 0$ при заземлении экранов с одной стороны или их транспозиции.

УЧЕТ КОНВЕКЦИИ ИМЕЮЩЕГОСЯ В ТРУБЕ ВОЗДУХА

Существует три основных механизма передачи тепла от кабеля к трубе через заполненный воздухом зазор между ними – это теплопроводность, конвекция, излучение. Наиболее важными являются первые два.

Ранее в [1] конвекция учитывалась не напрямую, а за счет внесения постоянной поправки в теплопроводность воздуха: удельное тепловое сопротивление воздуха было снижено со справочного значения $\rho_{в} = 30 \text{ К}\cdot\text{м}/\text{Вт}$ до экспертно принятого значения $10 \text{ К}\cdot\text{м}/\text{Вт}$.

Внесем изменения в методику [1], которые позволят точнее учесть конвективный теплообмен между кабелем и трубой.

Мощность, отведенная от кабеля к трубе за счет теплопроводности воздуха, заполняющего трубу, составляет (в расчете на 1 м длины) в обозначениях из [1]:

$$\Delta P_{в} = \frac{\Delta T}{R_{в}} = \alpha_{в} \cdot \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{r_{5}}{r_{4}}\right)} \cdot \Delta T$$

где $\alpha_{в} = \frac{1}{\rho_{в}}$ – удельная теплопроводность воздуха $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

ΔT – разность температур поверхности кабеля и трубы;

r_{4} – внешний радиус кабеля;

r_{5} – внутренний радиус трубы.

Мощность, отведенная от кабеля к трубе за счет конвекции воздуха (ВК), может быть оценена (в расчете на 1 м длины):

$$\Delta P_{\text{ВК}} = \alpha_{\text{ВК}} \cdot S \cdot \Delta T = \alpha_{\text{ВК}} \cdot (2\pi \cdot r_{4}) \cdot \Delta T,$$

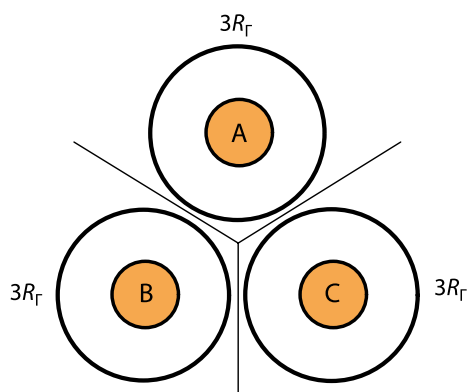
где $\alpha_{\text{ВК}}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$;

$S = (2\pi \cdot r_{4}) \cdot 1$ – площадь боковой поверхности участка кабеля длиной 1 м.

Относительная роль конвекции воздуха в охлаждении кабеля может быть оценена, как:

$$\frac{\Delta P_{\text{ВК}}}{\Delta P_{в}} = \frac{\alpha_{\text{ВК}}}{\alpha_{в}} \cdot \left[r_{4} \cdot \ln\left(\frac{r_{5}}{r_{4}}\right) \right].$$

• Рис. 2. Определение теплового сопротивления грунта



• **Таблица 1.** Длительно допустимый ток трехфазной группы однофазных кабелей 110 кВ 1000/240 мм², определенный по (3) в зависимости от основных влияющих факторов. Потерь в экранах нет.

#	Диаметр трубы D _Т , мм (r ₅ /r ₄ , о.е.)	Удельное тепловое сопротивление грунта ρ _Т , К·м/Вт					
		1	1,2	1,5	2	2,5	3
I. Фазы кабеля расположены в грунте сомкнутым треугольником							
0	нет	1057	980	890	782	706	648
II. Фазы кабеля расположены в грунте треугольником на расстоянии между осями, равном D_Т							
1	110 (1,13)	1082	1003	912	802	724	665
2	160 (1,64)	1112	1033	940	828	748	687
3	225 (2,30)	1143	1062	968	854	772	709
4	315 (3,22)	1176	1094	998	881	798	734
III. Фазы кабеля расположены в трубах треугольником на расстоянии между осями, равном D_Т							
1	110 (1,13)	999	938	863	771	703	649
2	160 (1,64)	982	930	864	780	716	665
3	225 (2,30)	1000	950	887	805	742	691
4	315 (3,22)	1027	978	917	837	774	723

• **Таблица 2.** Относительные значения допустимых для кабеля токов, полученные из табл. 1

#	Диаметр трубы D _Т , мм (r ₅ /r ₄ , о.е.)	Удельное тепловое сопротивление грунта ρ _Т , К·м/Вт					
		1	1,2	1,5	2	2,5	3
K₁ = I_П / I₁ – поправочный коэффициент на расстояние между фазами							
1	110 (1,13)	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,03
2	160 (1,64)	1,05	1,05	1,06	1,06	1,06	1,06
3	225 (2,30)	1,08	1,08	1,09	1,09	1,09	1,09
4	315 (3,22)	1,11	1,12	1,12	1,13	1,13	1,13
K₂ = I_П / I_П – поправочный коэффициент на трубы							
1	110 (1,13)	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98
2	160 (1,64)	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,97
3	225 (2,30)	0,87	0,89	0,92	0,94	0,96	0,97
4	315 (3,22)	0,87	0,89	0,92	0,95	0,97	0,99
K = K₁ · K₂ = I_П / I₁ – поправочный коэффициент на прокладку кабелей в трубах							
1	110 (1,13)	0,95	0,96	0,97	0,99	1,00	1,00
2	160 (1,64)	0,93	0,95	0,97	1,00	1,01	1,03
3	225 (2,30)	0,95	0,97	1,00	1,03	1,05	1,07
4	315 (3,22)	0,97	1,00	1,03	1,07	1,10	1,12

Как правило, внутренний диаметр трубы для прокладки кабеля в 1,5–2,0 раза больше диаметра кабеля, т.е. r₅ / r₄ = 1,5–2,0, тогда ln(r₅ / r₄) = 0,4–0,7. Диаметр кабеля может составлять до 5–10 см, а его радиус – до r₄ = 0,025–0,05 м. Теплопроводность воздуха зависит от его температуры и при температуре поверхности кабеля 80 °С может быть принята α_{ВК} = 0,03 Вт/(м·К).

Коэффициент α_{ВК} зависит от температуры воздуха и многих других факторов, учесть которые в общем случае невозможно.

В [3] для кабелей при 80 °С предлагается принимать α_{ВК} = 5 Вт/(м²·К). Подставив указанные цифры, найдем ΔP_{ВК} / ΔP_В = 1,5–6,0, т.е. именно конвекция – главный механизм передачи тепла от кабеля к трубе. Суммарная же передача тепла через воздух между кабелем и трубой, может быть определена как:

$$\Delta P_{В} + \Delta P_{ВК} = \Delta P_{В} \cdot \left(1 + \frac{\Delta P_{ВК}}{\Delta P_{В}} \right).$$

При сравнении выражения ΔP_В и ΔP_В + ΔP_{ВК} становится ясно, что конвекцию можно учесть, если вместо теплопроводности α_В в методике [1] использовать величину α'_В:

$$\begin{aligned} \alpha'_В &= \alpha_В \cdot \left(1 + \frac{\Delta P_{ВК}}{\Delta P_{В}} \right) = \alpha_В \cdot \left(1 + \frac{\alpha_{ВК}}{\alpha_В} \cdot \left[r_4 \cdot \ln \left(\frac{r_5}{r_4} \right) \right] \right) = \\ &= \alpha_В + \alpha_{ВК} \cdot \left[r_4 \cdot \ln \left(\frac{r_5}{r_4} \right) \right] \end{aligned}$$

Это же в полной мере относится и к обратной величине – удельному тепловому сопротивлению ρ_В = 1 / α_В, вместо которого при вычислении теплового сопротивления воздуха R_В, входящего в формулы (1)–(3) из [1], надо использовать величину ρ'_В = 1 / α'_В.

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Рассмотрим пример расчета по скорректированной формуле (3) из [1] для трехфазной группы однофазных кабелей 110 кВ с медными жилой 1000 мм² и экраном 240 мм². Приняты следующие данные:

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{\frac{F_{Ж}}{\pi}} = 0,018 \text{ м} \\ r_2 &= r_1 + \Delta_{ЖЭ} = 0,033 \text{ м} \\ r_3 &= \sqrt{r_2^2 + \frac{F_{Э}}{\pi}} = 0,034 \text{ м} \\ r_4 &= r_3 + \Delta_{ОБ} = 0,04 \text{ м} \end{aligned}$$

где Δ_{ЖЭ} – толщина изоляции кабеля (15 мм);
Δ_{ОБ} – толщина оболочки (6 мм),

$$r_5 = 0,5 \cdot D_T - \frac{D_T}{SDR},$$

$$r_6 = 0,5 \cdot D_T,$$

где D_Т и SDR – внешний диаметр трубы и ее SDR (с англ. Standart Dimension Ratio – стандартный размерный коэффициент) – отношение внешнего диаметра к толщине стенки).

Удельные тепловые сопротивления изоляции ρ_И = 3,5 К·м/Вт, оболочки ρ_О = 3,5 К·м/Вт. Температура грунта T_Г = 20 °С, глубина заложения кабеля h = 1 м, труба имеет типовой для кабельных сетей SDR = 11.

Результаты расчетов допустимого тока по (3) сведены в табл. 1 в зависимости от двух основных влияющих факторов – внешнего диаметра трубы D_Т = 0,110–0,315 м (от 110 до 315 мм) и удельного теплового сопротивления грунта ρ_Т = 1–3 К·м/Вт.

Расчеты табл. 1 выполнены для случая без потерь в экранах P_Э / P_Ж = 0 и P_Э = 0, так как для кабелей классов напряжения 110 кВ типовыми являются одностороннее заземление экранов или их транспозиция. Удельное тепловое сопротивление трубы и воздуха ρ_Т = 3 К·м/Вт, ρ_В = 30 К·м/Вт, коэффициент конвекции воздуха α_{ВК} = 5 Вт/(м²·К).

В случаях I и II труба отсутствует, фазы кабеля проложены в открытом грунте вплотную друг к другу (I) или на расстоянии D_Т (II). При этом при вычислениях по (3) удельные тепловые сопротивления ρ_В и ρ_Т приняты такими же как ρ_В, что как раз и означает отсутствие воздуха (В) и полиэтиленовой трубы (Т).

В случае III фазы кабеля проложены в трубах, расположенных сомкнутым треугольником. Расстояние между осями фаз кабеля, таким образом, будет составлять D_T .

Удельное тепловое сопротивление железобетонного лотка составляет около 1–2 К·м/Вт, что близко к свойствам грунта. Поэтому выводы, которые можно будет сделать на основе анализа случая I из табл. 1, в полной мере относятся не только к прокладке кабеля в грунте, но и к прокладке кабеля в железобетонных лотках.

Результаты расчетов по (3) неплохо совпадают, например, с каталогом фирмы АВВ, где в случае прокладки кабелей 1000/240 мм² с транспонированными экранами сомкнутым треугольником в грунте допустимые токи при тепловом сопротивлении грунта 1, 2 и 3 К·м/Вт составляют соответственно 1095, 810 и 668 А.

В табл. 2 представлены относительные значения допустимых для кабеля токов (по отношению к токам в случае I), анализ которых позволяет сделать несколько выводов, количественно справедливых только в условиях рассмотренного примера для кабеля 110 кВ, но качественно справедливых для любых КЛ, не имеющих паразитных токов и потерь мощности в экранах:

- по мере удаления фаз кабеля друга пропускная способность кабеля возрастает (коэффициент $K_1 = I_{III} / I_I$ от 1,02 до 1,13);
- помещение кабеля в трубу, заполненную воздухом, лишь незначительно снижает его пропускную способность (коэффициент $K_2 = I_{III} / I_{II}$ от 0,92 до 0,99), тогда как среди проектировщиков распространен излишне жесткий коэффициент 0,9, одинаковый вне зависимости от свойств грунта и диаметра трубы;
- замена традиционной прокладки фаз кабеля сомкнутым треугольником на их трубное расположение может как уменьшать, так и увеличивать пропускную способность КЛ (коэффициент $K = K_1 \cdot K_2 = I_{III} / I_I$ от 0,93 до 1,12);
- в грунтах с повышенным удельным сопротивлением $\rho_T > 1,5\text{--}2,0$ К·м/Вт замена сомкнутого треугольника на трубное расположение при верном выборе диаметра трубы может повысить пропускную способность КЛ до 12% (коэффициент $K = K_1 \cdot K_2 = I_{III} / I_I$ до 1,12).

При выборе размеров трубы принято придерживаться следующего правила: ее внутренний диаметр должен быть не менее чем в полтора раза больше диаметра прокладываемого кабеля (имеем $r_5 / r_4 \geq 1,5$). Вместе с тем, расчеты показали (табл. 2), что коэффициенты K_1, K_2, K_3 будут благоприятнее, если при выборе диаметра трубы придерживаться правила $r_5 / r_4 \geq 2\text{--}3$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена методика проведения оценочных тепловых расчетов кабельных линий с однофазными кабелями, учитывающая сразу два механизма теплопередачи: за счет теплопроводности и за счет конвекции.

2. Показано, что степень влияния трубы на пропускную способность кабельной линии зависит от целого ряда факторов (диаметр трубы, параметры грунта и др.), и в общем случае часто используемый проектировщиками универсальный поправочный коэффициент 0,9 на трубы не будет верным. Ряд оценочных расчетов, выполненных на примере кабеля 110 кВ, продемонстрировал, что такой коэффициент изменяется в широком диапазоне значений от 0,87 до 0,99.

3. Выявлено, что замена традиционной прокладки в открытом грунте на трубную при определенных условиях не только не снижает пропускную способность линии, а даже наоборот способна вызвать ее повышение вплоть до 12%. Это связано с тем, что при больших диаметрах труб они получают значительную площадь контакта с грунтом и хорошо охлаждаются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Кабельные линии, проложенные в полиэтиленовых трубах. Тепловой расчет // Новости ЭлектроТехники. 2013. № 4(82).
2. Титков В.В., Косоруков А.В. Тепловой расчет кабельных линий // Новости ЭлектроТехники. 2014. № 3(87).
3. Таджибаев А.И., Титков В.В. Влияние конвекции на тепловой режим электроустановок // ЭЛЕКТРО. 2008. № 6.