

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОЖИЛЬНОГО  
КАБЕЛЯ

В. И. НАПЛЕКОВ

(Представлена научным семинаром кафедры АТППП)

При вулканизации проводов и кабелей с резиновой изоляцией определяющим является тепловой процесс, связанный с прогревом оболочки. Для получения расчетных результатов значений времени вулканизации кабельного изделия необходимо знать характер изменения температуры в расчетной точке. Расчетной точкой нами из условия расчета режимов вулканизации принимается точка, находящаяся на нижней границе оболочки. Провода и кабели — сложные составные тела и получение аналитических решений распределения температур для них затруднительно. Эта задача может быть выполнена сведением решения распределения температур сложного тела к распределению температур фиктивного классического тела с эквивалентными теплофизическими характеристиками. Для получения эквивалентных теплофизических характеристик необходимо найти распределение температур для сложного тела. Одним из возможных методов решения этой задачи является численный метод. Для составления расчетных уравнений воспользуемся методом элементарных балансов. Рассмотрим задачу прогрева применительно к одножильному кабелю, имеющему наиболее простую, в силу симметрии легко формализуемую конструкцию: металлическая жила покрыта равномерным по толщине слоем резиновой изоляции (рис. 1).

Вулканизация оболочки происходит в среде насыщенного пара с большой величиной коэффициента теплоотдачи. Поэтому температуру на поверхности кабеля можно считать постоянной (граничные условия 1-го рода) и при выводе расчетных уравнений методом элементарных балансов использовать только уравнение Фурье.

$$q = \lambda \operatorname{grad} t.$$

Исходное уравнение для расчета температуры в резиновой оболочке будет иметь вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_p \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right). \quad (1)$$

Напишем его в конечных разностях. Для точки будем иметь

$$\frac{t_{R_i, \tau + \Delta \tau} - t_{R_i, \tau}}{\Delta \tau} = a_p \left[ \frac{(t_{R_i + \Delta R, \tau} + t_{R_i, \tau}) - (t_{R_i, \tau} - t_{R_i - \Delta R, \tau})}{\Delta R^2} + \frac{1}{R_i} \left( \frac{t_{R_i + \Delta R, \tau} - t_{R_i - \Delta R, \tau}}{2 \Delta R} \right) \right]. \quad (2)$$

Из условия устойчивости, которое запишется следующим образом:

$$\frac{2a_p \Delta\tau}{\Delta R^2} \leq 1,$$

найдем предельное значение шага по времени

$$\Delta\tau = \frac{\Delta R^2}{2a_p}. \quad (3)$$

Подставив (3) в уравнение (2) и произведя некоторые преобразования, получим выражение для текущего значения температуры в любой точке оболочки расчетной модели кабеля.

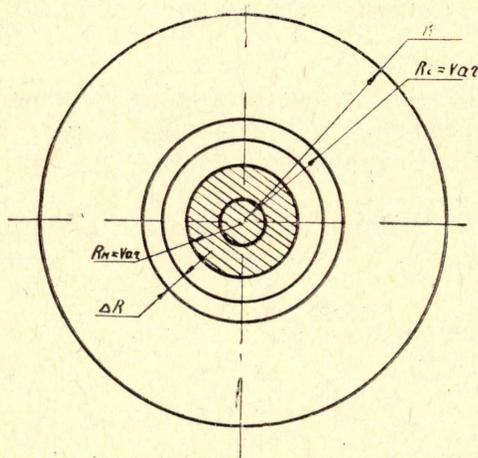


Рис. 1. Расчетная конструкция кабеля

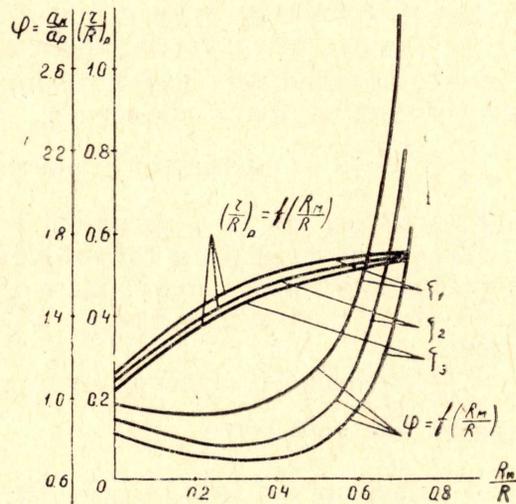


Рис. 2. Зависимость параметров  $\varphi$  и  $\left(\frac{r}{R}\right)_p$  от  $\frac{R_M}{R}$  при различных  $\xi$

$$t_{R_i, \tau + \Delta\tau} = \frac{t_{R_i + \Delta R, \tau} + t_{R_i - \Delta R, \tau}}{2} + \frac{1}{4n_d \frac{R_i}{R}} (t_{R_i + \Delta R, \tau} - t_{R_i - \Delta R, \tau}), \quad (4)$$

где

$t_{R_i, \tau + \Delta\tau}$  — рассчитываемое значение температуры;

$t_{R_i \pm \Delta R, \tau}$  — значение температуры, соответственно на слой выше и на слой ниже рассчитываемой точки;

$\frac{R_i}{R}$  — относительное положение расчетного слоя;

$n_d = \frac{R}{\Delta R}$  — число расчетных слоев;

$\Delta R$  — толщина расчетного слоя.

Для металлической жилы градиент температуры по координате  $\frac{R_i}{R}$  много меньше градиента температуры для резиновой изоляции, и поэтому его можно принять равным нулю. Тогда температуру металлической жилы можно найти из уравнения, составленного на основе теплового баланса

$$2\pi R \lambda_p \frac{t_{R_M + \Delta R, \tau} - t_{R_M, \tau}}{\Delta R} = C_M \gamma_M \pi R_M^2 \frac{t_{R_M, \tau + \Delta\tau} - t_{R_M, \tau}}{\Delta\tau}. \quad (5)$$

Подставив в уравнение (5) значение  $\Delta\tau$  из (3), развернем в нем значение коэффициента температуропроводности резины  $a_p = \frac{\lambda_p}{C_p \gamma_p}$  и, произведя некоторые преобразования, получим температуру металлической жилы:

$$t_{R_M, \tau + \Delta\tau} = t_{R_M, \tau} + \frac{1}{n_d \xi_i \frac{R_M}{R}} (t_{R_M + \Delta R, \tau} - t_{R_M, \tau}), \quad (6)$$

где:  $t_{R_M, \tau + \Delta\tau}$ ;  $t_{R_M, \tau}$  — температура металлической жилы соответственно для моментов времени  $\tau + \Delta\tau$  и  $\tau$ ;

$t_{R_M + \Delta R, \tau}$  — температура прилегающего слоя резиновой оболочки в точке, находящейся над металлической жилой на расстоянии  $\Delta R$  по радиусу для момента времени  $\tau$ ;

$\xi_i = \frac{C_M \gamma_M}{C_p \gamma_p}$  — параметр, характеризующий отношение объемных теплоемкостей жилы и изоляции.

По уравнениям (4) и (6) на ЭЦВМ были получены кривые прогрева одножильного кабеля при вариации параметров в следующих пределах:

1. Число делений цилиндра  $n_d = 10$ . В процессе расчетов не изменялось.

2. Изменение отношения радиуса металлической жилы к общему радиусу  $\frac{R_M}{R} = 0,2 \div 0,9$ .

3. Значения параметра  $\xi_i$  взяты следующие [1]:

а) для алюминиевой жилы —  $\xi_1 = 1,48$ ;

б) для медной жилы —  $\xi_2 = 2,02$ ;

в) для стальной жилы —  $\xi_3 = 2,20$ .

Начальное распределение температур принято равномерным по сечению резиновой оболочки и металлической жилы.

Имея кривые изменения температуры сложного тела в расчетной точке, необходимо найти эквивалентные теплофизические характеристики фиктивного классического тела, которые позволили бы воспользоваться решением распределения температур для классического тела. Один из возможных путей состоит в следующем [23]. Необходимо подобрать такое фиктивное классическое тело (в нашем случае удобнее взять в качестве классического тела «бесконечный» цилиндр) с коэффициентом температуропроводности  $a_k$  и координатной точкой  $\left(\frac{r}{R}\right)_p$ , для которой на стадии регулярного режима изменение температуры достаточно точно совпадает с изменением температуры в расчетной точке оболочки кабеля. Изменение относительной температуры на стадии регулярного режима определяется одним экспоненциальным членом ряда, являющегося решением распределения температур для любой точки «бесконечного» цилиндра [1].

$$\theta = 1,6 I_0 \left( 2,405 \frac{r}{R} \right) \exp \left( - 5,78 \left( \frac{a_k \tau}{R^2} \right) \right). \quad (7)$$

При расчете численным методом реальное время связано с расчетными шагами следующим соотношением:

$$\tau = \Delta\tau n. \quad (8)$$

Подставив (3), (8) в уравнение (7), получим

$$\theta = 1,6 I_0 \left( 2,405 \frac{r}{R} \right) \exp \left( - 2,89 \cdot 10^{-2} \varphi \cdot n \right), \quad (9)$$

$\varphi = \frac{a_k}{a_p}$  — параметр, характеризующий отношение коэффициента температуропроводности кабеля к коэффициенту температуропроводности резины,

$n$  — номер расчетного шага. Параметр  $\varphi$  определяется на стадии регулярного режима при двух разных значениях  $\Theta$  формулой, полученной по уравнению (7)

$$\varphi = \frac{\ln \Theta_2 - \ln \Theta_1}{2,89 \cdot 10^{-2} (n_1 - n_2)}. \quad (10)$$

Из уравнения (7) на стадии регулярного режима можно определить координату точки фиктивного классического тела, изотермичную расчетной

$$\left(\frac{r}{R}\right)_p = \frac{I_0^{-1} [\Theta_1 \exp(-2,89 \cdot 10^{-2} \cdot \varphi \cdot n)]}{2,405}. \quad (11)$$

На кривых изменения относительной температуры, в расчетной точке, полученных численным методом, выделяем участок регулярного режима и по формулам (10) и (11) находим расчетные значения  $a_k$  и  $\left(\frac{r}{R}\right)_p$ . Результаты расчетов представлены на графиках (рис. 2).

Графики позволяют по данным  $\frac{R_m}{R}$ ,  $\xi_i$ ,  $a_p$  определить эквивалентное значение координаты  $\left(\frac{r}{R}\right)_p$  и  $a_k$ .

Имея эквивалентные теплофизические характеристики  $\left(\frac{r}{R}\right)_p$  и  $a_k$ , можно воспользоваться решением распределения температуры для «бесконечного» одножильного кабеля, для которого необходимо знать поведение температуры в расчетной точке.

### Выводы

1. В статье приводится алгоритм вычисления численным методом температуры в любой точке оболочки и металлической жилы одножильного кабеля в случае прогрева при граничных условиях первого рода.

2. Из условия совпадения кривых распределения температур на стадии регулярного режима для расчетной точки оболочки кабеля и «бесконечного» однородного цилиндра получены формулы для определения эквивалентных теплофизических характеристик.

3. Получены графики расчетных значений  $\varphi$  и  $\left(\frac{r}{R}\right)_p$  в зависимости от конструкции кабеля и материала жил. Теплофизические характеристики, найденные с помощью этих графиков, позволяют при определении температуры в расчетной точке оболочки кабеля воспользоваться решением для однородного «бесконечного» цилиндра.

### ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. ГИТТЛ, М., 1952.
2. А. А. Татарников. Влияние медных жил на прогрев резиновой оболочки. Кабельная техника, № 39, 1966.