

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

ГОУ ВПО  
САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА «ЛОТОС-Т»

**«УТВЕРЖДАЮ»**

**Директор НПФ «Лотос-Т»  
доктор технических наук,  
профессор**



**И.И.Артюхов**

**12 ноября 2008 г.**

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

**по расчетным исследованиям температурных условий работы  
полиэтиленовых труб при их использовании в качестве каналов для  
прокладки кабельных линий 10-220 кВ**

Доцент кафедры  
«Электроснабжение промпредприятий»  
канд.техн.наук И.М.Хусаинов

## Список исполнителей

Доцент кафедры  
«Электроснабжение промпредприятий», к.т.н.

И.М.Хусаинов

Доцент кафедры  
«Промышленная теплотехника», к.т.н.

В.Н.Лункин

Гл. специалист НПФ «Градиент-С» СГТУ,  
к.т.н., доцент

Ю.И.Акимов

## СОДЕРЖАНИЕ

|   | Стр. |
|---|------|
| 1. Введение.....                              | 4    |
| 2. Методика расчетных исследований.....       | 5    |
| 2.1 Общий подход.....                         | 5    |
| 2.2. Тепловыделение кабелей.....              | 8    |
| 2.3. Тепловой расчет труб с кабелями.....     | 12   |
| 3. Расчеты тепловых режимов.....              | 20   |
| 3.1 Тепловой расчет гладких труб.....         | 20   |
| 3.2 Тепловой расчет профилированных труб..... | 29   |
| 4. Выводы.....                                | 35   |
| 5. Заключение.....                            | 36   |
| 6. Литература.....                            | 38   |
| Приложения.....                               | 39   |

## 1. Введение

Расчетные исследования температурных условий работы полиэтиленовых труб при их использовании в качестве каналов для прокладки кабельных линий 10-220 кВ проведены научно-производственной фирмой «Лотос-Т» СГТУ по договору с ООО «Группа Полипластик».

В настоящее время при сооружении кабельных каналов широко применяются толстостенные полиэтиленовые трубы. В настоящее время ООО «Группа Полипластик» выпускает полиэтиленовые трубы «Электрокор» с двухслойной профилированной стенкой, которые также предполагается использовать в качестве кабельных каналов при подземной прокладке или в монолитных строительных конструкциях.

Одной из особенностей труб «Электрокор» является то, что они имеют двухслойную, но очень тонкую стенку, а необходимая механическая прочность трубы обеспечена тем, что один из слоев стенки гофрирован. Это обстоятельство ограничивает диапазон температур, при которых гарантирована достаточная кольцевая жесткость, температурой +60 °С. И поэтому вынуждает учитывать нагрев трубы теплом, выделяемым лежащим в ней кабелем.

В данной работе тепловой режим внутри трубы исследуется применительно к широко используемым отечественным кабелям с бумажной изоляцией и новым кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена. При этом диаметр трубы для прокладки того или иного кабеля выбирался в соответствии с «Инструкцией по проектированию, прокладке, монтажу, ремонту и эксплуатации кабелепроводов на основе пластмассовых труб с двухслойной профилированной стенкой «Электрокор». Токовая нагрузка кабелей принималась равной максимально допустимой в соответствии с рекомендациями ПУЭ. Для сравнения исследуется также тепловой режим гладких полиэтиленовых труб с теми же типами кабелей.

## 2. Методика расчетных исследований

### 2.1 Общий подход

При прокладке кабеля в трубе его диаметр не должен превышать половины внутреннего диаметра трубы (для ограничения растягивающих усилий в процессе затягивания кабеля в трубу). Поэтому теплоотдача от кабеля к трубе происходит через воздушную прослойку, имеющую, как показано ниже, значительное термическое сопротивление. Поэтому температура воздуха вокруг кабеля существенно выше температуры грунта. Это, в соответствии с [1, п.1.3.9] заставляет снижать допустимый ток в кабеле, по сравнению с кабелем, проложенным в воздухе при температуре  $+25^{\circ}\text{C}$ . Поскольку температура воздуха в трубе изначально неизвестна, то невозможно определить и допустимый ток, а следовательно, и тепловыделение кабеля. Поэтому на первом этапе определяем тепловыделение кабеля для ряда температур в диапазоне  $+25\dots 50^{\circ}\text{C}$  (в соответствии с таблицей 1.3.3 из [1]. При этом полагаем, что при каждой температуре кабель нагружен максимально допустимым для этой температуры током. В результате получаем зависимость, представленную на рисунке 2.1.

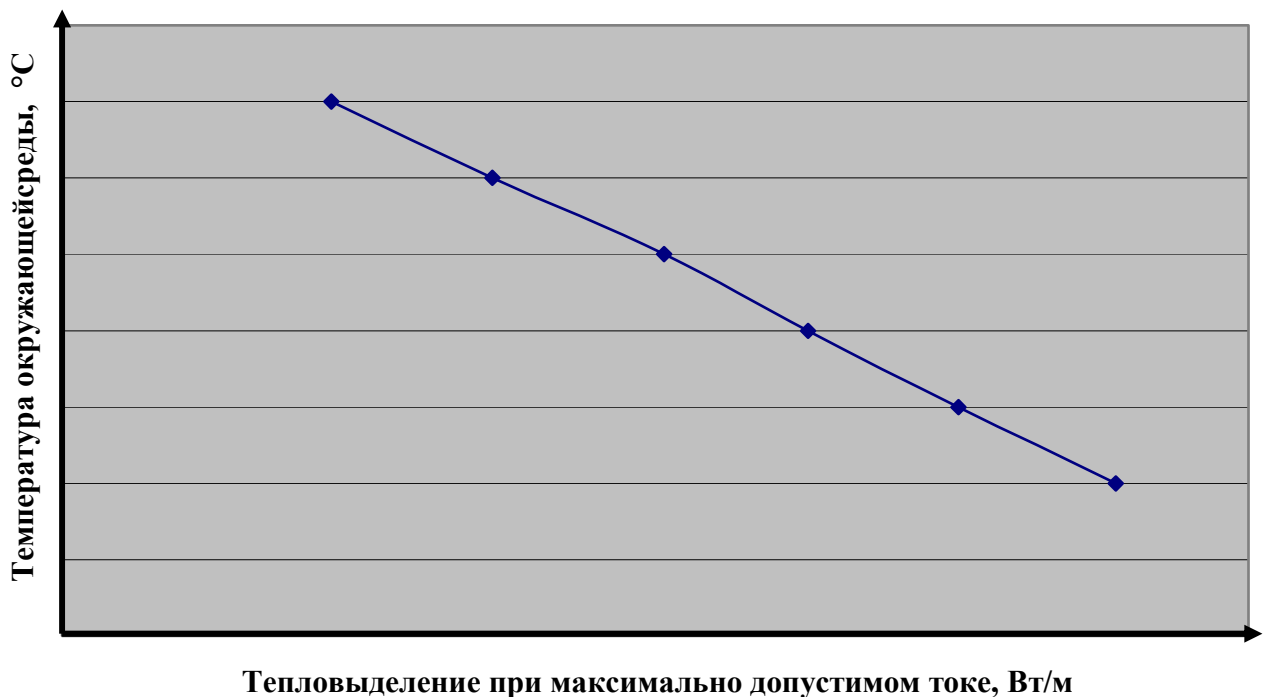


Рисунок 2.1

На втором этапе рассматриваем трубу, внутри которой находится цилиндрическое тепловыделяющее тело с диаметром, равным диаметру кабеля. Задаваясь температурами поверхности этого тела, производим тепловой расчет системы «Труба-грунт». При этом определяем температуры наружной и внутренней поверхности трубы, а также среднюю температуру воздуха в

прослойке для различных значениях линейной плотности теплового потока. При этом в качестве максимальной температуры поверхности тепловыделяющего тела принята температура  $+80^{\circ}\text{C}$  (в соответствии с максимальной температурой жилы кабелей  $+90^{\circ}\text{C}$ ). А в качестве минимальной – температура  $+40^{\circ}\text{C}$  (так как при такой температуре тела температура трубы будет явно меньше допустимых  $+60$ ). В результате получаем зависимость, представленную на рисунке 2.2

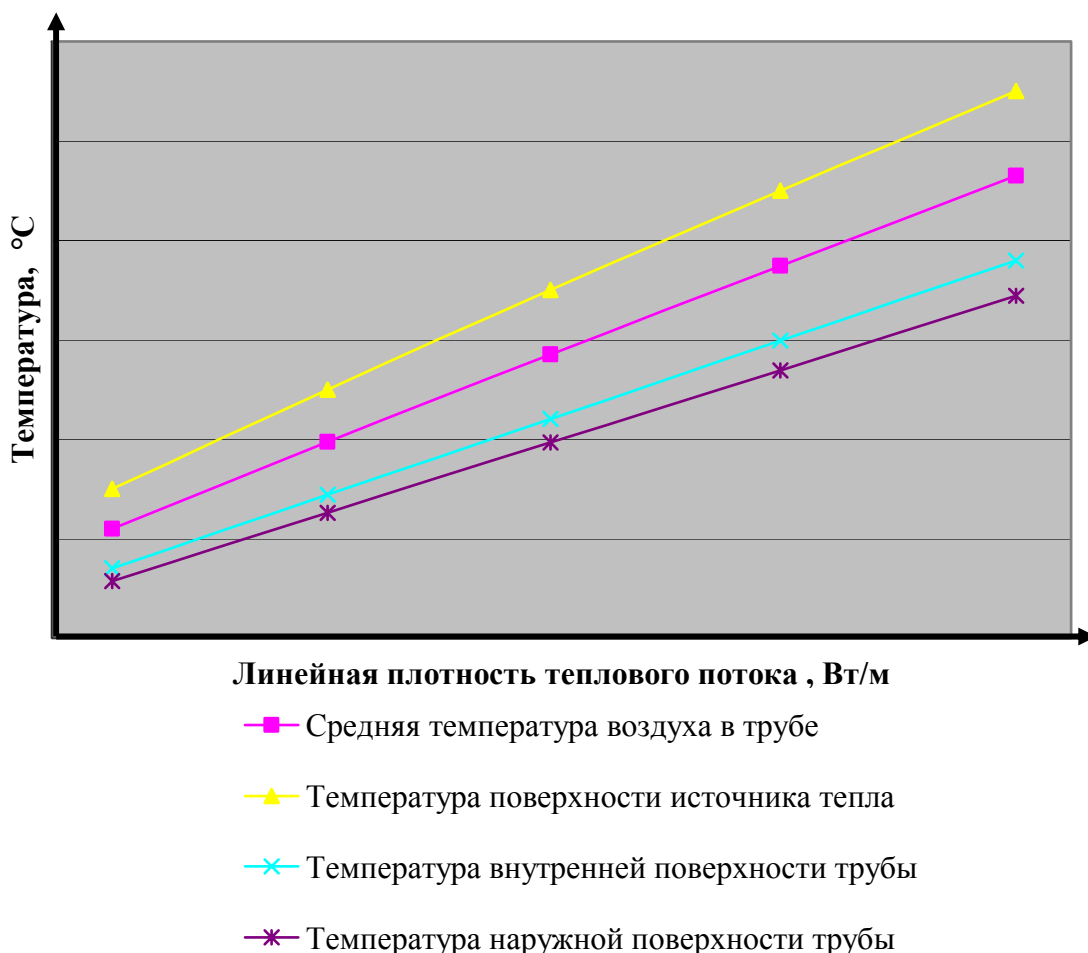
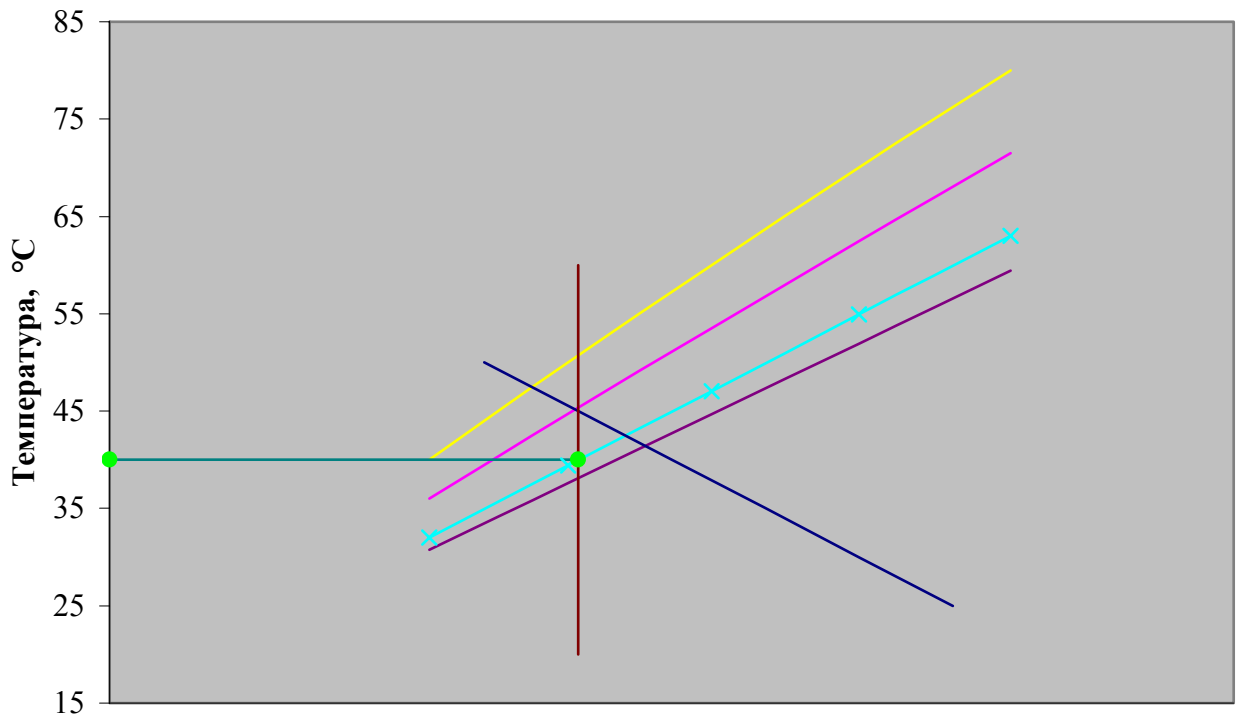


Рисунок 2.2

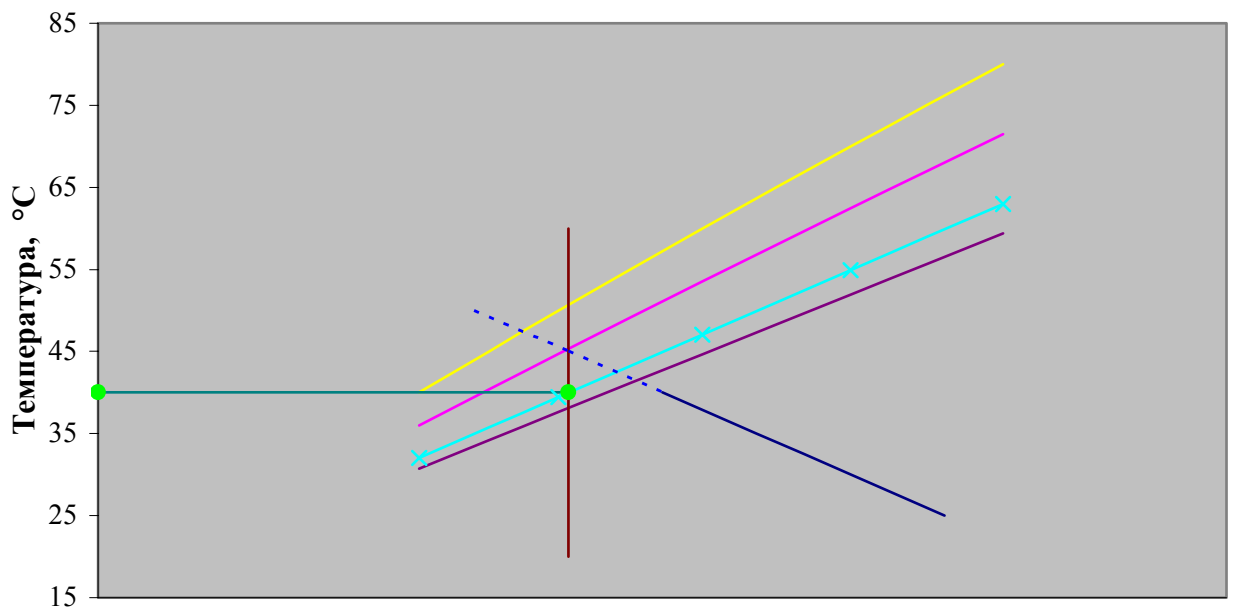
Далее накладываем зависимость 1 на зависимость 2. Точка пересечения линии средней температура воздуха в трубе и линии температуры окружающей среды для кабеля даст плотность теплового потока, которую может отвести система «Труба-грунт», равную тепловыделению кабеля. Соответствующая вертикальная линия укажет температуры внутренней стенки трубы. (Рисунок 2.3)

Если эти линии не пересекаются, то это означает, что данный кабель в данной трубе будет нагревать воздух до температуры выше  $+50^{\circ}\text{C}$ , и ток в нем нужно будет ограничивать еще сильнее, чем рекомендуется в таблице 1.3.3 из [1]. А температуру внутренней стенки трубы можно найти точно также, продлив линию кабеля до пересечения. (Рисунок 2.4).



Линейная плотность теплового потока (тепловыделение), Вт/м

Рисунок 2.3



Линейная плотность теплового потока (тепловыделение), Вт/м

Рисунок 2.4

## 2.2. Тепловыделение кабелей

### Технические характеристики кабелей

Некоторые технические характеристики трехжильных кабелей 10 кВ марки АПвПу с изоляцией из сшитого полиэтилена [3, табл.3.9.3]:

| Марка кабеля      | Внешний диаметр, мм | Номинальное сечение жилы, мм <sup>2</sup> | Длительно допустимый ток при прокладке в воздухе (температура воздуха +25°C), А |
|-------------------|---------------------|---|---|
| АПвПу 3x50/16-10  | 46                  | 3 x 50                                    | 160   |
| АПвПу 3x240/25-10 | 70                  | 3 x 240                                   | 431   |

Некоторые технические характеристики одножильных кабелей 35 кВ марки АПвПу с изоляцией из сшитого полиэтилена [3, табл.3.9.4]:

| Марка кабеля       | Внешний диаметр, мм | Номинальное сечение жилы, мм <sup>2</sup> | Длительно допустимый ток при прокладке в воздухе (температура воздуха +25°C), А |
|--------------------|---------------------|---|---|
| АПвПу 1x 50/16-35  | 38                  | 50  | 195   |
| АПвПу 1x 800/35-35 | 66                  | 800                                       | 1070  |

Некоторые технические характеристики одножильных кабелей 110 кВ марки АПвПу с изоляцией из сшитого полиэтилена [3, табл.3.9.14].

| Марка кабеля        | Внешний диаметр, мм | Номинальное сечение жилы, мм <sup>2</sup> | Длительно допустимый ток при прокладке в воздухе (температура воздуха +25°C), А |
|---------------------|---------------------|---|---|
| АПвПу 1x 185/35-110 | 64                  | 185                                       | 451   |
| АПвПу 1x1000/35-110 | 86                  | 1000                                      | 1244  |

Некоторые технические характеристики одножильных кабелей 220 кВ марки АПвПу с изоляцией из сшитого полиэтилена [3, табл.3.9.15]:

| Марка кабеля         | Внешний диаметр, мм | Номинальное сечение жилы, мм <sup>2</sup> | Длительно допустимый ток при прокладке в воздухе (температура воздуха +25°C), А |
|----------------------|---------------------|---|---|
| АПвПу 1x 630/150-220 | 107                 | 630                                       | 931   |
| АПвПу 1x1000/150-220 | 115                 | 1000                                      | 1215  |

Некоторые технические характеристики трехжильных кабелей 20 кВ фирмы "Pirelli" с изоляцией из сшитого полиэтилена [2, таблица к рисунку 3.7.7]:

| Марка кабеля      | Внешний диаметр, мм | Номинальное сечение жилы, мм <sup>2</sup> | Длительно допустимый ток при прокладке в воздухе (температура воздуха +25°C), А |
|-------------------|---------------------|---|---|
| АНХСМК-W 12/20 кВ | 66                  | 3 x 70                                    | 235   |
| АНХСМК-W 12/20 кВ | 89                  | 3 x 240                                   | 510   |



Некоторые технические характеристики трехжильных кабелей 10 кВ с бумажной изоляцией в алюминиевой оболочке [2, табл.3.1.39, 1, табл. 1.3.18]:

| Марка кабеля | Внешний диаметр, мм | Номинальное сечение жилы, мм <sup>2</sup> | Длительно допустимый ток при прокладке в воздухе (температура воздуха +25°C), А |
|--------------|---------------------|---|---|
| ААШвУ 3х50   | 37                  | 3 х 70                                    | 105   |
| ААШвУ 3х240  | 54                  | 3 х 240                                   | 270   |

Кабели 35 кВ с бумажной изоляцией не рассматриваем, так как допустимая температура их жил составляет +50°C [1, п. 1.3.12], что заведомо определяет температуру трубы ниже +60°C.

Расчет производим при условии полной загрузки кабеля, то есть когда температура жилы равна своему предельному значению. Электрическое сопротивление токопроводящих жил кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена в нагретом состоянии  $R_{\tau}$  определяем по выражению [4, табл.3.58]:

$$R_{\tau} = R_{20} \cdot \frac{(228 + \tau)}{254.5}$$

где  $R_{20}$  – сопротивление жилы постоянному току при температуре 20°C, Ом/км; для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена взято по [3, табл.3.9.10];

$\tau$  – допустимая температура жилы; для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена принимается 90°C.

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена имеют допустимую температуру 90°C. Сопротивления этих кабелей, рассчитанные по этой формуле для температуры 90°C, представлены в таблице.

| Марка кабеля          | Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup> | Сопротивление жилы постоянному току при 20°C | Допустимая температура жилы, °C | Сопротивление жилы при допустимой температуре, Ом/км |
|-----------------------|--|--|---------------------------------|--|
| АПвПу 3х50/16-10      | 50   | 0,641  | 90                              | 0,801  |
| АПвПу 3х240/25-10     | 240  | 0,125  | 90                              | 0,156  |
| АПвПу 1х 50/16-35     | 50   | 0,641  | 90                              | 0,801  |
| АПвПу 1х 800/35-35;   | 800  | 0,0367                                       | 90                              | 0,046  |
| АПвПу 1х 185/35-110;  | 185  | 0,164  | 90                              | 0,205  |
| АПвВнг 1х1000/35-110  | 1000   | 0,0291                                       | 90                              | 0,036  |
| АПвВнг 1х630/150-220  | 630  | 0,0464                                       | 90                              | 0,058  |
| АПвВнг 1х1000/150-220 | 1000   | 0,0291                                       | 90                              | 0,036  |

Сопротивления кабелей марки “Pirelli” при температуре 90°C, взяты по [2, таблица к рис. 3.7.7]:

| Марка кабеля      | Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup> | Сопротивление жилы постоянному току при 20°C | Допустимая температура жилы, °C | Сопротивление жилы при допустимой температуре, Ом/км |
|-------------------|--|--|---------------------------------|--|
| АНХСМК-W 12/20 кВ | 70   | 0,443  | 90                              | 0,57   |
| АНХСМК-W 12/20 кВ | 240  | 0,125  | 90                              | 0,16   |

Сопротивления кабелей марки ААШвУ 10 кВ с бумажной изоляцией не рассчитывались, а взяты по [2, таблица 3.3.3]. При этом предельная температура жилы в соответствии с [1, п. 1.3.12] принята равной 60°C:

| Марка кабеля | Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup> | Сопротивление жилы постоянному току при 20°C | Допустимая температура жилы, °C | Сопротивление жилы при допустимой температуре, Ом/км |
|--------------|--|--|---------------------------------|--|
| ААШвУ 3x50   | 50   | -  | 60                              | 0,683  |
| ААШвУ 3x240  | 240  | -  | 60                              | 0,142  |

### Тепловыделение кабелей при предельной температуре жил

Погонное (на 1 м длины) тепловыделение кабелей определяем по формуле:

$$q_1 = n \cdot (I_{25} \cdot k_t)^2 \cdot R_\tau / 1000, \text{ Вт/м;}$$

где  $n$  – количество жил кабеля, лежащих в одной трубе;

$I_{25}$  - допустимый ток при нормативной температуре окружающего воздуха +25°C, А;

$k_t$  - поправочный коэффициент на действительную температуру воздуха в трубе;

$R_\tau$  - сопротивление токопроводящей жилы кабеля при допустимой температуре жилы, Ом/км.

Поправочные коэффициенты на температуру воздуха для кабелей с бумажной изоляцией взяты по [1, табл. 1.3.3]. Для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена поправочные коэффициенты взяты по [3, табл. 3.9.5]

Результаты расчета тепловыделения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена представлены в таблице

| Температура воздуха в трубе, °С |                   | 25   | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     |
|---------------------------------|-------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| Поправочный коэффициент         |                   | 1  | 0,96   | 0,92   | 0,88   | 0,830  | 0,78   |
| Марка кабеля                    | Допустимый ток, А | Тепловыделение одного кабеля, Вт/м                       |        |        |        |        |        |
| АПвПу 1х 50/16-35               | 195               | 30,46  | 28,07  | 25,78  | 23,58  | 20,98  | 18,53  |
| АПвПу 1х 800/35-35;             | 1070              | 52,50  | 48,39  | 44,44  | 40,66  | 36,17  | 31,94  |
| АПвПу 1х 185/35-110;            | 451               | 41,68  | 38,41  | 35,28  | 32,28  | 28,71  | 25,36  |
| АПвВнг 1х1000/35-110            | 1244              | 56,27  | 51,86  | 47,63  | 43,58  | 38,76  | 34,23  |
| АПвВнг 1х630/150-220            | 931               | 50,25  | 46,31  | 42,53  | 38,92  | 34,62  | 30,57  |
| АПвВнг 1х1000/150-220           | 1215              | 53,68  | 49,47  | 45,43  | 41,57  | 36,98  | 32,66  |
| АНХСМК-W 3х70/35-20             | 235               | 94,43  | 87,03  | 79,93  | 73,13  | 65,06  | 57,45  |
| АНХСМК-W 3х240/70-20            | 510               | 124,85   | 115,06 | 105,67 | 96,68  | 86,01  | 75,96  |
|                                 |                   | Тепловыделение трех кабелей, лежащих в общей трубе, Вт/м |        |        |        |        |        |
| АПвПу 1х 50/16-35               | 195               | 91,37  | 84,20  | 77,33  | 70,75  | 62,94  | 55,59  |
| АПвПу 1х 800/35-35;             | 1070              | 157,50   | 145,16 | 133,31 | 121,97 | 108,51 | 95,83  |
| АПвПу 1х 185/35-110;            | 451               | 125,04   | 115,24 | 105,84 | 96,83  | 86,14  | 76,08  |
| АПвВнг 1х1000/35-110            | 1244              | 168,81   | 155,57 | 142,88 | 130,73 | 116,29 | 102,70 |
| АПвВнг 1х630/150-220            | 931               | 150,76   | 138,94 | 127,60 | 116,75 | 103,86 | 91,72  |
| АПвВнг 1х1000/150-220           | 1215              | 161,03   | 148,41 | 136,30 | 124,70 | 110,93 | 97,97  |

Результаты расчета тепловыделения кабелей 10 кВ с бумажной изоляцией представлены в таблице

| Температура воздуха в трубе, °С |                   | 25                                 | 30    | 35    | 40    | 45    | 50   |
|---------------------------------|-------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|
| Поправочный коэффициент         |                   | 1,00                               | 0,93  | 0,85  | 0,76  | 0,66  | 0,54 |
| Марка кабеля                    | Допустимый ток, А | Тепловыделение одного кабеля, Вт/м |       |       |       |       |      |
| ААШвУ 3х50                      | 105               | 22,59                              | 19,54 | 16,32 | 13,05 | 9,84  | 6,59 |
| ААШвУ 3х240                     | 270               | 31,06                              | 26,86 | 22,44 | 17,94 | 13,53 | 9,06 |

### 2.3. Тепловой расчет труб с кабелями

Исходные данные:

- глубина прокладки в земле 0,7 м.;
- монолитная (гладкая) труба-оболочка из ПВП SDR21. SDR26 по ТУ 2248–024–40270293–2004 и гофрированная (с двухслойной профилированной стенкой) труба КОРСИК или «Электрокор» SN4, SN8 по ТУ2248-010-59355492-2006;
- теплопроводность грунта с малой влажностью  $\lambda_{гр} = 0,83$  Вт/(м·К).

Внутри цилиндрической оболочки различной конструкции находится линейный источник тепловой энергии (электрический кабель) мощностью  $q_l$ , Вт/м (смотри рис. 2.5)

Превышение температуры поверхности кабеля  $t_{п.каб}$  над окружающей средой (грунтом) описывается зависимостью:

$$\Delta t = t_{п.каб} - t_{гр} = q_l \cdot (R_{l\text{ в.пр}} + R_{l\text{ ст}} + R_{l\text{ гр}}),$$

где  $R_{l\text{ в.пр}}$  - термическое сопротивление воздушной прослойки между кабелем и трубой-оболочкой, (м·К)/Вт;

$R_{l\text{ ст}}$  - термическое сопротивление стенки трубы-оболочки, (м·К)/Вт;

$R_{l\text{ гр}}$  - термическое сопротивление грунта, (м·К)/Вт;

Превышение температуры внутренней поверхности трубы-оболочки  $t_{вн.п.тр}$  над окружающей средой (землей) описывается зависимостью:

$$\Delta t = t_{вн.п.тр} - t_{гр} = q_l \cdot (R_{l\text{ гр}} + R_{l\text{ гр}})$$

Термическое сопротивление грунта, (м·К)/Вт,

$$R_{l\text{ гр}} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{гр} \cdot \chi} \cdot \ln \frac{4h}{D_{нар}}$$

$\lambda_{гр}$ - теплопроводность грунта, принимаем 1/1,2=0,83 Вт/(м·К) -худшие условия по теплоотводу;

$\chi$  - учитывает ухудшение условий теплоотвода в межреберном пространстве, изменяется от 0,6 до 0,75 в зависимости от геометрии гофры и диаметра трубы. Для гладкой трубы  $\chi = 1$

$D_{нар} = D_2$  - наружный диаметр гладкой трубы, а для гофрированной трубы

$$D_{нар} = D_{прив} = \frac{F_{гоф.тр.}}{\pi},$$

где  $F_{гоф.тр.}$  - площадь наружной поверхности гофрированной трубы.

Термическое сопротивление стенки трубы-оболочки, (м·К)/Вт:

- для гладкой трубы-оболочки

$$R_{l\text{ ст}} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{ст}} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1},$$

$\lambda_{ст}$ - теплопроводность материала трубы, 0,43 Вт/(м·К);

$D_2$ ;  $D_1$  – наружный и внутренний диаметры стенки трубы-оболочки.

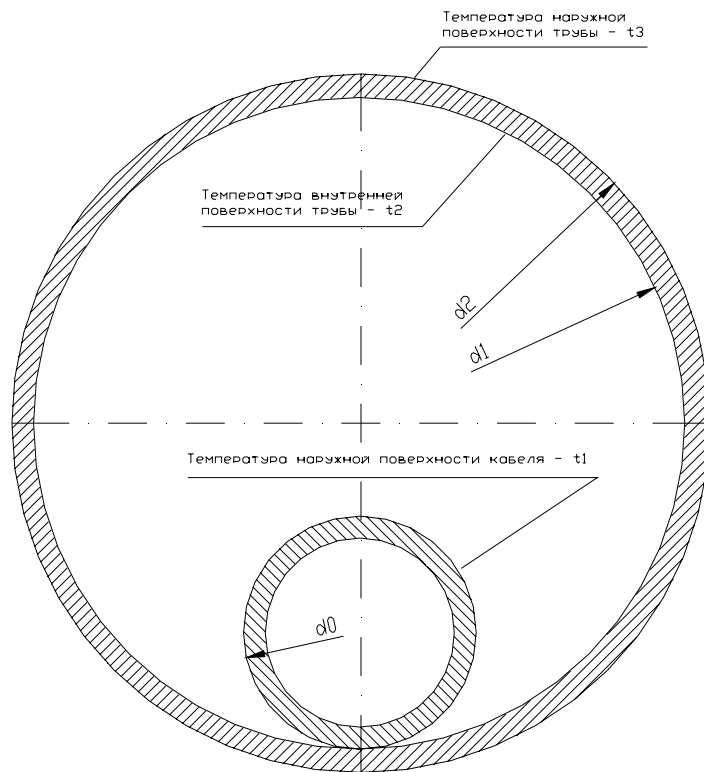


Рис. 1 – Обозначения расчетных величин гладкой трубы

## Рисунок 2.5

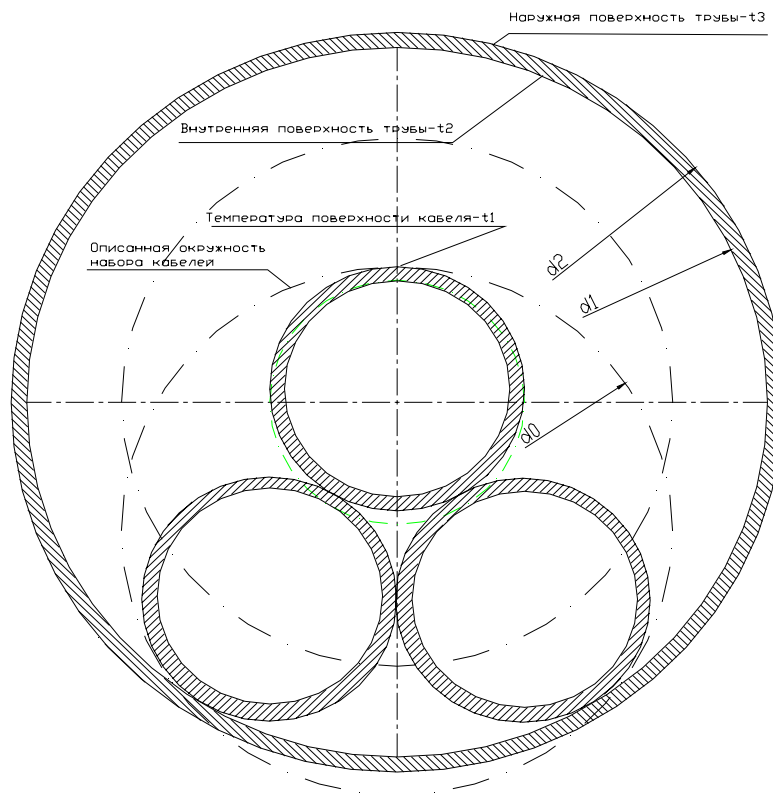


Рис. 2- Обозначение расчетных величин гладкотрувной трубы с набором кабелей.

Рисунок 2.6

- для гофрированной трубы

$$R_{1 \text{ ст. прив.}} = (R_{1 \text{ ст. гл.}} \cdot (S_{\text{гоф}} - b_{\text{гоф}}) + R_{1 \text{ ст. гоф}} \cdot b_{\text{гоф}}) / S_{\text{гоф}}$$

где  $S_{\text{гоф}}, b_{\text{гоф}}$  – шаг и ширина гофры, м;

$R_{1 \text{ ст. гл.}}$ ;  $R_{1 \text{ ст. гоф}}$  – термическое сопротивление гладкого участка трубы и гофрированного, (м·К)/Вт.

$$R_{1 \text{ ст. гл.}} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{\text{ст}}} \cdot \ln \frac{D_{2a}}{D_1},$$

где  $D_{2a}; D_1$  – диаметры гладкого участка трубы-оболочки двухслойной.

Термическое сопротивление профилированной стенки (гофры) рассчитывалось по двум методикам:

- 1 По сумме последовательных сопротивлений: внутренней стенки, воздушной прослойки в ребре гофры и наружной стенки;
- 2 По теории теплоотдачи через ребра [6].

### Методика 1

$R_{1 \text{ ст. гоф}}$  состоит (рис. 2.7) из сопротивлений первого  $R_{1 \text{ ст1}}$  и второго  $R_{1 \text{ ст2}}$  слоев стенки трубы-оболочки и сопротивления воздушной среды  $R_{1 \text{ воз. реб}}$  между ними (в ребре).

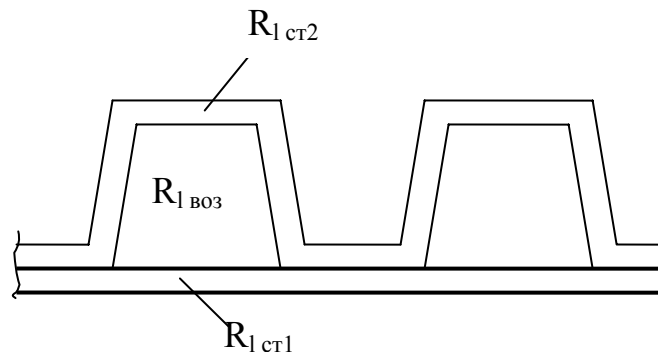


Рис. 2.7 – Термические сопротивления по ребру

$$R_{1 \text{ ст. гоф}} = R_{1 \text{ ст1}} + R_{1 \text{ воз}} + R_{1 \text{ ст2}}$$

$R_{1 \text{ ст1}}$  и  $R_{1 \text{ ст2}}$  – рассчитываются аналогично  $R_{1 \text{ ст. гл}}$  по диаметрам слоев стенки.

Термическое сопротивление воздушной прослойки в ребре и воздушной прослойки внутри трубы рассчитывается по методике [5].

Теплообмен через замкнутую воздушную прослойку происходит теплопроводностью, конвекцией и излучением, что учитывается эквивалентным коэффициентом теплопроводности

$$\lambda_3 = \lambda_k + \lambda_l$$

Коэффициент теплопроводности конвекцией, Вт/(м·К),

$$\lambda_k = \epsilon_k \cdot \lambda_{\text{воз}},$$

где  $\epsilon_k$  – коэффициент конвекции, безразмерный

$$\varepsilon_k = A \cdot \sqrt[4]{\delta^3 \cdot \Delta t}$$

где  $\Delta t$  – перепад температур в воздушной прослойке,  $^{\circ}\text{C}$ ;

- внутри трубы  $\Delta t = t_1 - t_2$

- в ребре  $\Delta t = t_3 - t_4$

где  $t_1$  и  $t_2$  – температура поверхности кабеля и тепловоспринимающей внутренней поверхности стенки трубы,  $^{\circ}\text{K}$ ;

$t_3$  и  $t_4$  – температуры на границах прослойки в ребре (рис.2.8).

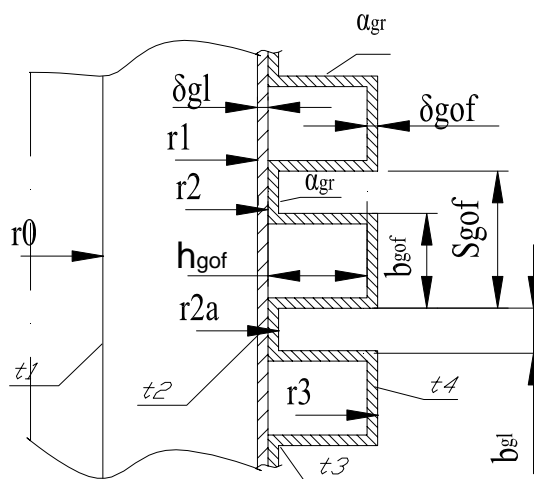


Рис. 4 – Распределение температуры и обозначение радиусов по сечению гофры.

## Рисунок 2.8

Для решения этой задачи необходимо задаваться  $t_1$  и  $t_2$  с последующим их уточнением.

$\delta$  – усредненная геометрически толщина воздушной прослойки внутри трубы - оболочки, м:

- для одиночного кабеля  $D_0$  в трубе

$$\delta = \frac{D_1^2 - D_0^2}{2 \cdot (D_1 + D_0)} = \frac{D_1 - D_0}{2},$$

- для трех кабелей в трубе

$$\delta = \frac{D_1 - D_{\text{опис}}}{2},$$

$D_1$  - внутренний диаметр трубы-оболочки;

$D_{\text{опис}}$  - диаметр описанной окружности трех кабелей

$$D_{\text{опис}} = D_0 \left( 1 + \frac{1}{\cos 30} \right)$$

Для одинакового диаметра всех трех кабелей

$$D_{\text{опис}} = 2,155 D_0$$



$\delta_{\text{реб}}$  – усредненная геометрически толщина воздушной прослойки в ребре принималась

$$\delta_{\text{реб}} = 0,7h_{\text{гоф}}$$

0,7 – учитывает усредненное по высоте ребра (с учетом торца ребра) расстояние от основания ребра.

A – определяется физическими свойствами воздуха

$$A = 0,18 \cdot \sqrt[4]{\frac{\beta \cdot g}{a \cdot \nu}} = \frac{0,319}{\sqrt[4]{(t + 273) \cdot a \cdot \nu}}$$

Значения «A» приведены в таблице [5].

Если вычисленная величина  $\epsilon_k$  оказывается меньше 1 (при малых толщинах прослойки), то принимают  $\lambda_k = \lambda_{\text{воз}}$  - как для неподвижного воздуха.

В расчетной программе для ЭВМ  $\epsilon_k$  рассчитывался аналогично:

Критерий Грасгофа

$$Gr = \frac{\beta \delta^3 g \Delta t}{\nu^2}$$

Критерий Прандтля для воздуха

$$Pr = 0,706 - 0,00021t_g + 0,00000034t_g^2 \approx 0,7$$

При  $Gr \cdot Pr > 1000$

$$\epsilon_k = 0,18 (Gr \cdot Pr)^{0,25}$$

или  $\epsilon_k = A \cdot \sqrt[4]{\delta^3 \Delta t}$

где  $A = 0,18 \cdot \frac{(\beta g Pr)^{0,25}}{\nu^{0,5}}$

Коэффициент теплопроводности излучением  $\lambda_n$  для цилиндрической воздушной прослойки в трубе, Вт/(м·К),

$$\lambda_n = \alpha_n \cdot \frac{D_0}{2} \cdot \ln \frac{D_1}{D_0},$$

где  $D_0$  и  $D_1$  - диаметр внутренней и наружной поверхности прослойки, м;

$\alpha_n$  - коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

$$\alpha_n = \frac{C_n \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{t_1 - t_2},$$

$T_1$  и  $T_2$  – температура абсолютная поверхности кабеля и тепловоспринимающей стенки трубы, °К;

Для решения этой задачи необходимо задаваться  $T_1$  и  $T_2$  с последующим их уточнением.

$C_n$  – коэффициент взаимного излучения (обеих поверхностей), Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

$$C_n = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s} \right)},$$

где  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_s$  – коэффициенты излучения поверхностей кабеля, стенки и абсолютно черного тела,  $C_s=5,77 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Для стенки пластмассовой трубы принято [7]  $C_2=5,19$ , для кабеля  $C_1=4,62$ .

Для приближенного определения  $\lambda_3$  при  $C=4,7 \div 5,3$  можно воспользоваться графиком (рис 4-5 из [5]).

## Методика 2

Расчет теплообмена со стороны ребристой стенки производился на основании рекомендаций [5,6]. В данном случае использовались зависимости, характеризующие теплопроводность круглого ребра постоянной толщины. Количество теплоты и температура на конце ребра ребристой стенки определялись по формулам:

Количество теплоты, отдаваемое ребром [6]

$$Q_p = 2 \cdot 3,14 \cdot r_2 \cdot \lambda_3 \cdot b_{\text{гоф}} \cdot m \cdot \theta_1 \cdot \psi,$$

Температура на конце ребра [6]

$$\theta_2 = \theta_1 \frac{I_0(m \cdot r_3) \cdot K_1(m \cdot r_3) + I_1(m \cdot r_3) \cdot K_0(m \cdot r_3)}{I_0(m \cdot r_2) \cdot K_1(m \cdot r_3) + I_1(m \cdot r_3) \cdot K_0(m \cdot r_2)}.$$

Здесь

$$\psi = \frac{I_1(m \cdot r_3) \cdot K_1(m \cdot r_2) - I_1(m \cdot r_2) \cdot K_1(m \cdot r_3)}{I_0(m \cdot r_2) \cdot K_1(m \cdot r_3) + I_1(m \cdot r_3) \cdot K_0(m \cdot r_2)},$$

$I_0(mr)$ ,  $K_0(mr)$  – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода нулевого порядка;

$I_1(mr)$ ,  $K_1(mr)$  – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода первого порядка;

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_{\text{реб}}}{\lambda_3 \cdot b_{\text{гоф}}}} - \text{комплекс};$$

$\alpha_{\text{реб}}$  – коэффициент, характеризующий интенсивность теплообмена на границах гофра,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$\lambda_3$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности гофра,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$b_{\text{гоф}}$  – толщина выступа гофра, м;

$r_2$ ,  $r_3$  – соответственно радиусы основания и вершины гофра, м;

$\theta_1 = t_3 - t_{\text{сп}}$  – избыточная температура в основании гофра, °С;

$t3$  – температура основания гофра, °С;

$t_{zp}$  - температура грунта, °С;

$\theta2=t4-t_{zp}$  – избыточная температура вершины гофра, °С;

$t4$  – температура вершины гофра, °С.

Количество теплоты, передаваемое гладкими участками поверхности гофрированной трубы, Вт,

$$Q_{zл} = \alpha_{реб} \cdot (t3a - t_{zp}) \cdot H_{zл},$$

где  $H_{zл}$  – поверхность гладких участков трубы, приходящихся на 1 п. м. гофрированной трубы, м<sup>2</sup>;

$t3a$  – температура наружной поверхности гладких участков гофрированной трубы, °С.

Количество теплоты, передаваемое гофрированной трубой длиной 1 м, Вт/м,

$$Q_{реб.тр} = Q_p \cdot n_p + Q_{zл},$$

где  $n_p$  – количество ребер на 1 м длины ребристой трубы, шт.

Коэффициент, характеризующий интенсивность теплообмена на границах гофра, принимался с учетом значений линейного термического сопротивления на вершине гофра, диаметра гофрированной трубы и геометрических характеристик гофра.

$$\alpha_{реб} = \left( E \cdot \frac{H_{реб}}{H_{пол}} + \frac{H_{zл}}{H_{пол}} \right) \cdot \alpha$$

Коэффициент эффективности ребра

$$E = \frac{\tanh_{гоф}(m \cdot h_{гоф})}{m \cdot h_{гоф}},$$

где  $h_{гоф}$  – высота гофра, м.

Условное термическое сопротивление 1 п. м. гофрированной трубы, м·К/Вт

$$R_{уст} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot \lambda_s \cdot b_{гоф} \cdot m \cdot \psi \cdot n_p \cdot r1 + \alpha_{реб} \cdot H_{zл}}.$$

### 3. Расчеты тепловых режимов труб с кабелями

#### 3.1 Тепловой расчет гладких труб

по ТУ 2248–024–40270293–2004

Рассматриваются сочетания «труба-кабель», представленные на рисунках 2.8 и 2.9

Трубы полиэтиленовые гладкие

Марка  
и диаметр кабеля, мм

Тепловыделение, Вт/м  
при температуре:



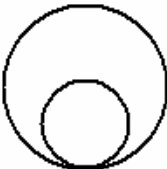
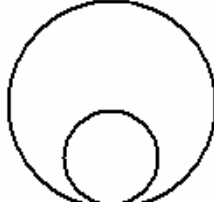
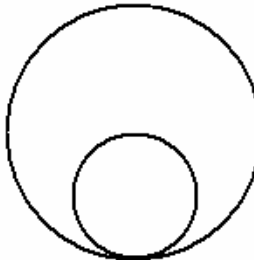
|   |                              | 25°    | 30°    | 35°    | 40°   | 45°   | 50°   |
|---|------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| <br><b>110/99</b>    | АПвПу 3x50/16-10 (46мм)      | 52,06  | 47,98  | 44,07  | 40,32 | 35,87 | 31,68 |
|   | АПвПу 1x 50/16-35 (38мм)     | 30,46  | 28,07  | 25,78  | 23,58 | 20,98 | 18,53 |
|   | ААШвУ 3x50 - 10 (37мм)       | 22,59  | 19,54  | 16,32  | 13,05 | 9,84  | 6,59  |
| <br><b>125/113</b>   | ААШвУ 3x240 - 10 (54мм)      | 31,06  | 26,86  | 22,44  | 17,94 | 13,53 | 9,06  |
| <br><b>160/144</b> | АПвПу 1x 800/35-35 (66мм)    | 52,50  | 48,39  | 44,44  | 40,66 | 36,17 | 31,94 |
|   | АПвПу 1x 185/35-110 (64мм)   | 41,68  | 38,41  | 35,28  | 32,28 | 28,71 | 25,36 |
|   | АНХАМК-W 3x70/35 -20 (66мм)  | 94,43  | 87,03  | 79,93  | 73,13 | 65,06 | 57,45 |
|   | АПвПу 3x240/25-10 (70мм)     | 73,67  | 67,90  | 62,36  | 57,05 | 50,75 | 44,82 |
| <br><b>200/181</b> | АПвПу 1x1000/35-110 (86мм)   | 56,27  | 51,86  | 47,63  | 43,58 | 38,76 | 34,23 |
|   | АНХАМК-W 3x240/70 -20 (89мм) | 124,85 | 115,06 | 105,67 | 96,68 | 86,01 | 75,96 |
| <br><b>250/226</b> | АПвПу 1x630/150-220 (107мм)  | 50,25  | 46,31  | 42,53  | 38,92 | 34,62 | 30,57 |
|   | АПвПу 1x1000/150-220 (115мм) | 53,68  | 49,47  | 45,43  | 41,57 | 36,98 | 32,66 |

Рисунок 2.8

**Гладкие полиэтиленовые трубы  
(3 кабеля в одной трубе)**

**Марка  
и диаметр кабеля, мм**

**Тепловыделение, Вт/м  
при температуре:**


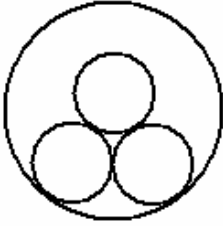
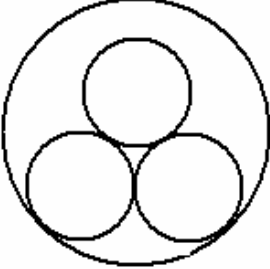
|   |   | 25°   | 30°              | 35°              | 40°              | 45°             | 50°             |
|---|---|---|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| <br><b>125/113</b>   | 3Х АПвПу 1х 50/16-35 (38мм)   | 91,37   | 84,20            | 77,33            | 70,75            | 62,94           | 55,59           |
|   | <br><b>200/181</b> | 3Х АПвПу 1х 800/35-35 (66мм)<br>3Х АПвПу 1х 185/35-110 (64мм) | 157,50<br>125,04 | 145,16<br>115,24 | 133,31<br>105,84 | 121,97<br>96,83 | 108,51<br>86,14 |
| <br><b>250/226</b> | 3Х АПвПу 1х 1000/35-110 (86мм)  | 168,81  | 155,57           | 142,88           | 130,73           | 116,29          | 102,70          |

Рисунок 2.9

Параметры труб представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Толщина стенок труб из полиэтилена ПЭ 63, ПЭ 80, ПЭ 100 SDR26, SDR 21

| Номинальный<br>наружный<br>диаметр | SDR 26<br>S 12,5  |              |              | SDR 21<br>S 10    |              |              |
|------------------------------------|-------------------|--------------|--------------|-------------------|--------------|--------------|
|                                    | номин.<br>толщина | пред. откл.  |              | номин.<br>толщина | пред. откл.  |              |
|                                    |                   | 1 сорт       | 2 сорт       |                   | 1 сорт       | 2 сорт       |
| 110                                | 4,2               | +0,8<br>-0,1 | +1,0<br>-0,2 | 5,3               | +1,1<br>-0,2 | +1,2<br>-0,3 |
| 125                                | 4,8               | +1,0<br>-0,2 | +1,1<br>-0,3 | 6,0               | +1,2<br>-0,2 | +1,4<br>-0,3 |
| 140                                | 5,4               | +1,1<br>-0,2 | +1,2<br>-0,3 | 6,7               | +1,3<br>-0,2 | +1,5<br>-0,3 |
| 160                                | 6,2               | +1,2<br>-0,2 | +1,4<br>-0,3 | 7,7               | +1,5<br>-0,3 | +1,8<br>-0,4 |
| 180                                | 6,9               | +1,4<br>-0,2 | +1,6<br>-0,4 | 8,6               | +1,7<br>-0,3 | +2,0<br>-0,5 |
| 200                                | 7,7               | +1,5<br>-0,3 | +1,8<br>-0,4 | 9,6               | +1,9<br>-0,3 | +2,2<br>-0,5 |
| 225                                | 8,6               | +1,7<br>-0,3 | +2,0<br>-0,5 | 10,8              | +2,2<br>-0,4 | +2,5<br>-0,6 |
| 250                                | 9,6               | +1,9<br>-0,3 | +2,2<br>-0,5 | 11,9              | +2,4<br>-0,4 | +2,7<br>-0,6 |

Результаты расчета представлены в таблицах 2-5.

Таблица 2 – Расчет термических сопротивлений гладких труб

| Номинальный<br>наружный диаметр,<br>$D_{нар}$<br><br>мм | Внутренний диаметр,<br>мм |       | Термическое<br>сопротивление<br>грунта, $R_{гр}$ ,<br><br>(м·К)/Вт | Термическое<br>сопротивление стенки,<br>$R_{ст}$ , (м·К)/Вт |        | Термическое<br>сопротивление<br>$R_{гр} + R_{ст}$ ,<br>(м·К)/Вт |       |
|---|---------------------------|-------|--|---|--------|---|-------|
|   | SDR26                     | SDR21 |  | SDR26   | SDR21  | SDR26   | SDR21 |
| 110   | 101,6                     | 99,4  | 0,617  | 0,0294  | 0,0375 | 0,646   | 0,655 |
| 125   | 115,4                     | 113   | 0,594  | 0,0296  | 0,0374 | 0,624   | 0,631 |
| 140   | 129,2                     | 126,6 | 0,572  | 0,0297  | 0,0373 | 0,602   | 0,609 |
| 160   | 147,6                     | 144,6 | 0,547  | 0,0299  | 0,0375 | 0,577   | 0,584 |
| 180   | 166,2                     | 162,8 | 0,524  | 0,0295  | 0,0372 | 0,553   | 0,561 |
| 200   | 184,6                     | 180,8 | 0,504  | 0,0297  | 0,0374 | 0,534   | 0,541 |
| 225   | 207,8                     | 203,4 | 0,482  | 0,0295  | 0,0374 | 0,511   | 0,519 |
| 250   | 230,8                     | 226,2 | 0,460  | 0,0296  | 0,0371 | 0,490   | 0,497 |

Таблица 3– Расчет температурного перепада  $\Delta t = t_{\text{вн.п.тр}} - t_{\text{гр}}$  для гладких труб в зависимости от теплового потока

| Номинальный<br>наружный<br>диаметр, $D_{\text{нар}}$<br><br>мм | SDR   | Температурный перепад, $\Delta t = t_{\text{вн.п.тр}} - t_{\text{гр}}$ , °С |       |       |       |       |       |       |       |       |       |     |
|--|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
|  |       | Тепловой поток, $q_1$ , Вт/м  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |     |
|  |       | 10  | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   | 110 |
| 110  | SDR26 | 6,46  | 12,92 | 19,38 | 25,84 | 32,3  | 38,76 | 45,22 |       |       |       |     |
|  | SDR21 | 6,54  | 13,08 | 19,62 | 26,16 | 32,7  | 39,24 | 45,78 |       |       |       |     |
| 125  | SDR26 | 6,24  | 12,48 | 18,72 | 24,96 | 31,20 | 37,44 | 43,68 | 49,92 |       |       |     |
|  | SDR21 | 6,31  | 12,62 | 18,93 | 25,24 | 31,55 | 37,86 | 44,17 | 50,48 |       |       |     |
| 140  | SDR26 | 6,02  | 12,04 | 18,06 | 24,08 | 30,10 | 36,12 | 42,14 | 48,16 |       |       |     |
|  | SDR21 | 6,09  | 12,18 | 18,27 | 24,36 | 30,40 | 36,54 | 42,63 | 48,71 |       |       |     |
| 160  | SDR26 | 5,77  | 11,54 | 17,31 | 23,08 | 28,85 | 34,62 | 40,39 | 46,16 |       |       |     |
|  | SDR21 | 5,84  | 11,68 | 17,52 | 23,36 | 29,20 | 35,04 | 40,88 | 46,72 |       |       |     |
| 180  | SDR26 | 5,53  | 11,06 | 16,59 | 22,12 | 27,65 | 33,18 | 38,71 | 44,24 | 49,77 |       |     |
|  | SDR21 | 5,61  | 11,22 | 16,83 | 22,44 | 28,05 | 33,66 | 39,27 | 44,88 | 50,49 |       |     |
| 200  | SDR26 | 5,34  | 10,68 | 16,02 | 21,36 | 26,70 | 32,04 | 37,38 | 42,72 | 48,06 |       |     |
|  | SDR21 | 5,41  | 10,82 | 16,23 | 21,64 | 27,05 | 32,46 | 37,87 | 43,28 | 48,69 |       |     |
| 225  | SDR26 | 5,11  | 10,22 | 15,33 | 20,44 | 25,55 | 30,66 | 35,77 | 40,88 | 45,99 |       |     |
|  | SDR21 | 5,19  | 10,38 | 15,57 | 20,76 | 25,95 | 31,14 | 36,33 | 41,52 | 46,71 |       |     |
| 250  | SDR26 | 4,90  | 9,80  | 14,70 | 19,60 | 24,5  | 29,40 | 34,30 | 39,2  | 44,10 | 49,00 |     |
|  | SDR21 | 4,97  | 9,94  | 14,91 | 19,88 | 24,85 | 29,82 | 34,30 | 39,76 | 44,73 | 49,70 |     |

Так как по условию температура стенки не должна превышать  $60^{\circ}\text{C}$ , то  $\Delta t$  не должен превышать  $45^{\circ}\text{C}$ .

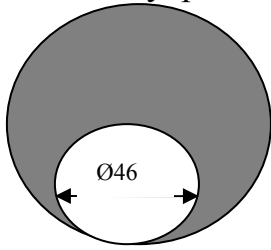
$$t_{\text{вн.п.тр}} = t_{\text{гр}} + \Delta t$$



Для расчета тепловыделения кабеля необходимо предварительно оценить среднюю температуру воздуха внутри трубы-оболочки.

Рассмотрим гладкую трубу-оболочку  $D_{нар}=110$  мм SDR21.

Внутренний диаметр трубы  $D_{вн}=99,4$  мм.



Диаметр кабеля  $D_{каб}$  принимаем 46 мм.

Принимаем расчетное тепловыделение кабеля  $q_1=33,37$  Вт/м. при принятой средней температуре воздуха внутри оболочки  $t_{воз.ср}=45$  °С.

Этому  $q_1$  соответствует  $\Delta t_1=21,82$  °С

Тогда  $t_{вн.п.тр} = t_{гр} + \Delta t_1 = 15 + 21,82 = 36,82$  °С

Температура поверхности кабеля

$$t_{п.каб} = 2t_{воз.ср} - t_{вн.п.тр} = 2 \cdot 45 - 36,82 = 53,15$$
 °С

Тогда  $\Delta t_{воз.п} = t_{п.каб} - t_{вн.п.тр} = 53,15 - 36,82 = 16,33$  °С;

Коэффициент конвекции безразмерный

$$\epsilon_k = A \cdot \sqrt[4]{\delta^3 \cdot \Delta t} = 17 \cdot \sqrt[4]{0,0267^3 \cdot 16,33} = 2,26$$

$\delta$  – усредненная геометрически толщина воздушной прослойки в трубе-оболочке,

$$\delta = \frac{D_{вн}^2 - D_{каб}^2}{2 \cdot (D_{вн} + D_{каб})} = \frac{0,0994^2 - 0,046^2}{2 \cdot (0,0994 + 0,046)} = 0,0267 \text{ м}$$

Коэффициент теплопроводности конвекцией, Вт/(м·К),

$$\lambda_k = \epsilon_k \cdot \lambda_{воз} = 2,26 \cdot 0,0276 = 0,0624$$

Приведенный коэффициент излучения, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

$$C_n = \frac{1}{\frac{1}{4,6} + \frac{0,0046}{0,00994} \left( \frac{1}{5} - \frac{1}{5,77} \right)} = 4,35$$

Коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_l = \frac{4,35 \left[ \left( \frac{326,2}{100} \right)^4 - \left( \frac{309,8}{100} \right)^4 \right]}{53,15 - 36,82} = 5,62$$

Коэффициент теплопроводности излучением  $\lambda_l$ , Вт/(м·К),

$$\lambda_l = 5,62 \cdot \frac{0,046}{2} \cdot \ln \frac{0,0994}{0,046} = 0,0995$$

Эквивалентный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К),

$$\lambda_3 = \lambda_k + \lambda_l = 0,0624 + 0,0995 = 0,162$$

По графику (рис 4-5) из [1] приближенно  $\lambda_3=0,175$  Вт/(м·К),

Термическое сопротивление воздушной прослойки, (м·К)/Вт

$$R_{l \text{ воз.п}} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_3} \cdot \ln \frac{D_{\text{вн}}}{D_{\text{каб}}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,162} \cdot \ln \frac{0,00994}{0,0046} = 0,757.$$

Проверяем принятое  $\Delta t_{\text{воз.п}} = 16,33 \text{ } ^\circ\text{C}$

Для  $q_l = 33,37 \text{ Вт/м}$  получим

$$\Delta t_{\text{воз.п}} = q_l \cdot R_{l \text{ воз.п}} = 33,37 \cdot 0,757 = 25,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{воз.ср}} = 36,82 + 25,2/2 = 49,42 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Температура поверхности кабеля для  $q_l = 33,37 \text{ Вт/м}$

$$t_{\text{п.каб}} = t_{\text{гр}} + q_l \cdot (R_{l \text{ в.пр}} + R_{l \text{ ст}} + R_{l \text{ гр}}) = 15 + 33,37 \cdot (0,757 + 0,0375 + 0,617) = 62 \text{ } ^\circ\text{C}$$

А задавались  $t_{\text{п.каб}} = 53,15 \text{ } ^\circ\text{C}$  – расхождение большое при  $q_l = 33,37 \text{ Вт/м}$ .

Перерасчет при  $t_{\text{воз.ср}} = 47,4 \text{ } ^\circ\text{C}$  и соответствующем тепловыделении кабеля  $q_l = 32,3 \text{ Вт/м}$  дал хорошую сходимость результатов.

Результаты расчета теплового режима гладких труб-оболочек с различными кабелями представлены в Приложении 1.1....1.16 и в сводных таблицах 4,5.

Таблица 4 – Результаты теплового расчета гладких труб с одним кабелем

| Показатель                                | Диаметр трубы, мм           |                               |                               |                             |                                 |                                |                                  |                                |                                  |                                       |                                   |  |
|---|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--|
|   | 110                         |                               |                               | 125                         | 160                             |                                |                                  |                                | 200                              |                                       | 250                               |  |
|   | Диаметр, мм, и марка кабеля |                               |                               |                             |                                 |                                |                                  |                                |                                  |                                       |                                   |  |
|   | 37<br>ААШвУ<br>3*50-10      | 38<br>АПвПу<br>1*50/<br>16-35 | 46<br>АПвПу<br>3*50/<br>16-10 | 54<br>ААШвУ<br>3*240-<br>10 | 64<br>АПвПу<br>1*185/<br>35-110 | 66<br>АПвПу<br>1*800/<br>35-35 | 66<br>АНХАМК-<br>W<br>3*70/35-20 | 70<br>АПвПу<br>3*240/<br>25-10 | 86<br>АПвПу<br>1*1000/<br>35-110 | 89<br>АНХАМК-<br>W<br>3*240/70-<br>20 | 107<br>АПвПу<br>1*630/<br>150-220 | 115<br>АПвПу<br>1*1000/<br>150-<br>220 |
| Тепловой поток                            | 16,5                        | 23,0                          | 32,7                          | 22,0                        | 31,9                            | 36,0                           | 48,5                             | 43,1                           | 39,0                             | 60,0                                  | 37,9                              | 40,2                                   |
| Температура поверхности кабеля            | 42,7                        | 50,3                          | 60,1                          | 43,1                        | 51,3                            | 55,2                           | 67,3                             | 62,3                           | 53,3                             | 69,4                                  | 47,8                              | 48,0                                   |
| Средняя температура воздуха в трубе       | 34,0                        | 40,5                          | 48,0                          | 36,4                        | 42,0                            | 45,3                           | 55,2                             | 51,0                           | 44,1                             | 57,7                                  | 40,9                              | 42,0                                   |
| Температура внутренней поверхности стенки | 26,6                        | 30,8                          | 36,8                          | 27,9                        | 33,0                            | 36,0                           | 43,3                             | 40,1                           | 36,5                             | 46,8                                  | 33,0                              | 34,6                                   |

Таблица 5 – Результаты теплового расчета гладких труб с тремя кабелями

| Показатель                                | Диаметр трубы SDR21, мм                  |  |  |  |  |  |  |  |
|---|--|--|--|--|--|--|--|--|
|   | 125                                      |  | 200                                      |  |  |  | 250                                      |  |
|   | Диаметр, мм, и марка кабеля              |  |  |  |  |  |  |  |
|   | 38*3<br>3*АПвПу<br>1*50/16-35            |  | 64*3<br>3*АПвПу<br>1*185/35-110          |  | 66*3<br>3*АПвПу<br>1*800/35-35           |  | 86*3<br>АПвПу<br>1*1000/35-110           |  |
|   | По температуре воздуха 50 <sup>0</sup> С | По тепловыделению кабеля<br>$q_{каб}=f(t_{воз})$ | По температуре воздуха 50 <sup>0</sup> С | По тепловыделению кабеля<br>$q_{каб}=f(t_{воз})$ | По температуре воздуха 50 <sup>0</sup> С | По тепловыделению кабеля<br>$q_{каб}=f(t_{воз})$ | По температуре воздуха 50 <sup>0</sup> С | По тепловыделению кабеля<br>$q_{каб}=f(t_{воз})$ |
| Предельно длительный тепловой поток, Вт/м | 43,0                                     | 47,9   | 53,1                                     | 62,5   | 53,0                                     | 69,9   | 58,7                                     | 76,7   |
| Температура поверхности кабеля            | 58,0                                     | 65,2   | 57,1                                     | 64,2   | 57,3                                     | 68,8   | 56,4                                     | 67,3   |
| Средняя температура воздуха в трубе       | 50                                       | 55,2   | 50                                       | 56,0   | 50                                       | 60,5   | 50                                       | 59,8   |
| Температура внутренней поверхности стенки | 41,6                                     | 45,3   | 42,8                                     | 47,8   | 42,6                                     | 52,2   | 43,5                                     | 52,3   |

### 3.2 Расчет профилированных труб из ПВХ

(Трубы с двухслойной профилированной стенкой «Электрокор»)  
по ТУ 2248–010–59355492–2006

Рассматриваются сочетания «труба-кабель», представленные на рисунках 2.10 и 2.11

#### Трубы профилированные "Электрокор"

Марка  
и диаметр кабеля, мм

Тепловыделение, Вт/м  
при температуре:



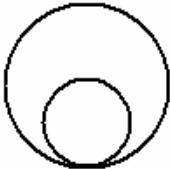
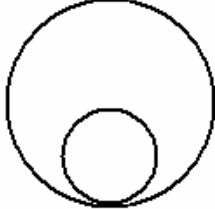
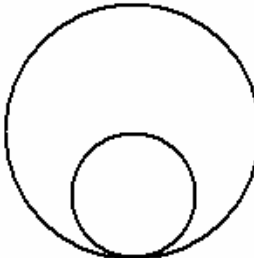
|   |                              | 25°    | 30°    | 35°    | 40°   | 45°   | 50°   |
|---|------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| <br><b>110/91</b>    | АПВПу 3x50/16-10 (46мм)      | 52,06  | 47,98  | 44,07  | 40,32 | 35,87 | 31,68 |
|   | АПВПу 1x 50/16-35 (38мм)     | 30,46  | 28,07  | 25,78  | 23,58 | 20,98 | 18,53 |
|   | ААШВУ 3x50 - 10 (37мм)       | 22,59  | 19,54  | 16,32  | 13,05 | 9,84  | 6,59  |
| <br><b>125/107</b>  | ААШВУ 3x240 - 10 (54мм)      | 31,06  | 26,86  | 22,44  | 17,94 | 13,53 | 9,06  |
| <br><b>160/139</b> | АПВПу 1x 800/35-35 (66мм)    | 52,50  | 48,39  | 44,44  | 40,66 | 36,17 | 31,94 |
|   | АПВПу 1x 185/35-110 (64мм)   | 41,68  | 38,41  | 35,28  | 32,28 | 28,71 | 25,36 |
|   | АНХАМК-W 3x70/35 -20 (66мм)  | 94,43  | 87,03  | 79,93  | 73,13 | 65,06 | 57,45 |
|   | АПВПу 3x240/25-10 (70мм)     | 73,67  | 67,90  | 62,36  | 57,05 | 50,75 | 44,82 |
| <br><b>200/176</b> | АПВПу 1x1000/35-110 (86мм)   | 56,27  | 51,86  | 47,63  | 43,58 | 38,76 | 34,23 |
|   | АНХАМК-W 3x240/70 -20 (89мм) | 124,85 | 115,06 | 105,67 | 96,68 | 86,01 | 75,96 |
| <br><b>250/216</b> | АПВПу 1x630/150-220 (107мм)  | 50,25  | 46,31  | 42,53  | 38,92 | 34,62 | 30,57 |
|   | АПВПу 1x1000/150-220 (115мм) | 53,68  | 49,47  | 45,43  | 41,57 | 36,98 | 32,66 |

Рисунок 2.10

## Трубы профилированные "Электрокор"

(3 кабеля в одной трубе)


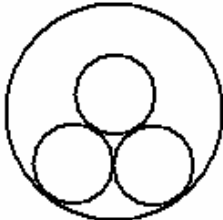
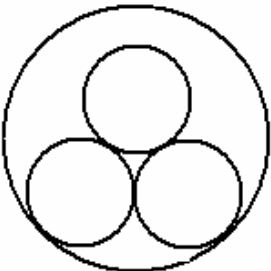
| Марка<br>и диаметр кабеля, мм  | Тепловыделение, Вт/м<br>при температуре: |                  |                  |                 |                 |                |
|--|--|------------------|------------------|-----------------|-----------------|----------------|
|  | 25°                                      | 30°              | 35°              | 40°             | 45°             | 50°            |
| <br><b>125/107</b><br>3х АПвПу 1х 50/16-35 (38мм)                                   | 91,37                                    | 84,20            | 77,33            | 70,75           | 62,94           | 55,59          |
| <br><b>200/176</b><br>3х АПвПу 1х 800/35-35 (66мм)<br>3х АПвПу 1х 185/35-110 (64мм) | 157,50<br>125,04                         | 145,16<br>115,24 | 133,31<br>105,84 | 121,97<br>96,83 | 108,51<br>86,14 | 95,83<br>76,08 |
| <br><b>250/216</b><br>3х АПвПу 1х 1000/35-110 (86мм)                              | 168,81                                   | 155,57           | 142,88           | 130,73          | 116,29          | 102,70         |

Рисунок 2.11

Таблица 6 - Геометрические характеристики труб «Электрокор»

| Размер<br>трубы<br>$D_n/d_1$ | Толщина<br>стенки<br>гофра, $e_3$ |      | Толщина<br>стенки<br>внутреннего<br>слоя, $e_5$ |      | Высота<br>гофра,<br>$e_c$ | Толщина<br>стенки,<br>$e_4$ | Шаг<br>гофра,<br>$t$ | Ширина<br>выступа<br>гофра,<br>$l$ |
|------------------------------|-----------------------------------|------|---|------|---------------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------------------|
|                              | SN 4                              | SN 8 | SN 4  | SN 8 |                           |                             |                      |                                    |
| 110/91                       | 0.4                               | 0.5  | 0,3   | 0,8  | 8,7                       | 1,0                         | 12.6                 | 8.6                                |
| 125/107                      | 0.4                               | 0.6  | 0,5   | 0,8  | 9,0                       | 1,1                         | 12.6                 | 8.6                                |
| 160/139                      | 0.4                               | 0.7  | 0,6   | 0,8  | 10,0                      | 1,0                         | 12.6                 | 9.0                                |
| 200/176                      | 0.5                               | 0.7  | 1,1   |      | 13,0                      | 1,4                         | 16.5                 | 12.0                               |
| 250/216                      | 0.5                               | 0.8  | 1,4   |      | 15,0                      | 1,7                         | 37                   | 23.0                               |

В отличие от гладких труб термическое сопротивление гофрированной стенки трубы-оболочки зависит от теплового потока, который определяет распределение температур по толщине (ребру) стенки. Эти температуры влияют на эквивалентный коэффициент теплопроводности воздушной прослойки, а значит на термическое сопротивление гофра.

Линейное термическое сопротивление грунта (отнесенное к одному погонному метру гофрированной трубы) при расчете по методике 2 входит в условное термическое сопротивление ребристой стенки.

Результаты расчета термических сопротивлений стенка-грунт гофрированных труб по двум методикам представлены в таблицах 6.

Результаты расчета теплового режима гофрированных труб с расположенными в них различными кабелями представлены в сводных таблицах 7,8 и в Приложении 2.1....2.16.

Таблица 6 – Термическое сопротивление стенка-грунт гофрированной трубы SN 8

| Размер<br>трубы<br>$D_n/d_1$<br>Диаметр<br>кабеля,<br>мм | Тепловой поток, $q_1$ , Вт/м                      |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|--|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|  | 30  |                    | 40                 |                    | 50                 |                    | 60                 |                    | 70                 |                    |
|  | Термическое сопротивление $R_{ст-гр}$<br>(м·К)/Вт |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|  | Мето-<br>дика<br>1                                | Мето-<br>дика<br>2 | Мето-<br>дика<br>1 | Мето-<br>дика<br>2 | Мето-<br>дика<br>1 | Мето-<br>дика<br>2 | Мето-<br>дика<br>1 | Мето-<br>дика<br>2 | Мето-<br>дика<br>1 | Мето-<br>дика<br>2 |
| <u>110/91</u><br>37                                      | 0,798   | 0,790              |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| <u>125/107</u><br>54                                     |   |                    | 0,781              | 0,770              |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| <u>160/139</u><br>66                                     |   |                    |                    |                    | 0,730              | 0,724              |                    |                    |                    |                    |
| <u>200/176</u><br>86                                     |   |                    |                    |                    |                    |                    | 0,629              | 0,620              |                    |                    |
| <u>250/216</u><br>115                                    |   |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    | 0,603              | 0,591              |



Таблица 7 – Результаты теплового расчета гофрированных труб SN 8 с одним кабелем (методика 2)

| Показатель                                | Диаметр трубы, мм           |                               |                               |                             |                                 |                                |                              |                                |                                  |                                   |                                   |  |
|---|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
|   | 110                         |                               |                               | 125                         | 160                             |                                |                              |                                | 200                              |                                   | 250                               |  |
|   | Диаметр, мм, и марка кабеля |                               |                               |                             |                                 |                                |                              |                                |                                  |                                   |                                   |  |
|   | 37<br>ААШвУ<br>3*50-10      | 38<br>АПвПу<br>1*50/<br>16-35 | 46<br>АПвПу<br>3*50/<br>16-10 | 54<br>ААШвУ<br>3*240-<br>10 | 64<br>АПвПу<br>1*185/<br>35-110 | 66<br>АПвПу<br>1*800/<br>35-35 | 66<br>АНХАМК-W<br>3*70/35-20 | 70<br>АПвПу<br>3*240/<br>25-10 | 86<br>АПвПу<br>1*1000/<br>35-110 | 89<br>АНХАМК-W<br>3*240/70-<br>20 | 107<br>АПвПу<br>1*630/<br>150-220 | 115<br>АПвПу<br>1*1000/<br>150-<br>220 |
| Тепловой поток, Вт/м                      | 15,2                        | 21,5                          | 30,1                          | 20,1                        | 28,4                            | 32,9                           | 43,4                         | 39,3                           | 37,3                             | 55,3                              | 36,0                              | 37,7                                   |
| Температура поверхности кабеля            | 43,2                        | 52,8                          | 62,6                          | 45,5                        | 53,2                            | 58,0                           | 70,0                         | 64,0                           | 54,0                             | 70,5                              | 49,9                              | 51,3                                   |
| Средняя температура воздуха в трубе       | 35,6                        | 42,7                          | 50,8                          | 38,5                        | 45,1                            | 48,8                           | 58,8                         | 54,0                           | 46,0                             | 60,1                              | 43,3                              | 44,5                                   |
| Температура внутренней поверхности стенки | 27,9                        | 32,6                          | 38,9                          | 31,2                        | 37,0                            | 39,6                           | 47,7                         | 44,0                           | 38,2                             | 49,6                              | 36,7                              | 37,7                                   |

Примечание: Результаты по трубам SN 4 очень близки (тепловой поток отличается на 0,7-1%, а температура стенки - на 0,2-0,4%)

Таблица 8 – Результаты теплового расчета гофрированных труб с тремя кабелями (методика 2)

| Показатель                                | Диаметр трубы SN 8, мм                   |  |  |  |  |  |  |  |
|---|--|--|--|--|--|--|--|--|
|   | 125                                      |  | 200                                      |  |  |  | 250                                      |  |
|   | Диаметр, мм, и марка кабеля              |  |  |  |  |  |  |  |
|   | 38*3<br>3*АПвПу<br>1*50/16-35            |  | 64*3<br>3*АПвПу<br>1*185/35-110          |  | 66*3<br>3*АПвПу<br>1*800/35-35           |  | 86*3<br>3*АПвПу<br>1*1000/35-110         |  |
|   | По температуре воздуха 50 <sup>0</sup> С | По тепловыделению кабеля<br>$q_{каб}=f(t_{воз})$ | По температуре воздуха 50 <sup>0</sup> С | По тепловыделению кабеля<br>$q_{каб}=f(t_{воз})$ | По температуре воздуха 50 <sup>0</sup> С | По тепловыделению кабеля<br>$q_{каб}=f(t_{воз})$ | По температуре воздуха 50 <sup>0</sup> С | По тепловыделению кабеля<br>$q_{каб}=f(t_{воз})$ |
| Тепловой поток, Вт/м                      | 35,0                                     | 43,2   | 45,3                                     | 58,1   | 45,8                                     | 63,8   | 49,9                                     | 68,1   |
| Температура поверхности кабеля            | 57,6                                     | 67,8   | 56,3                                     | 66,8   | 57,1                                     | 70,5   | 56,5                                     | 68,4   |
| Средняя температура воздуха в трубе       | 50,0                                     | 58,9   | 50                                       | 59,3   | 50                                       | 62,4   | 50                                       | 62,6   |
| Температура внутренней поверхности стенки | 42,5                                     | 49,9   | 43,6                                     | 51,7   | 42,9                                     | 54,2   | 44,6                                     | 56,6   |

Примечание: Результаты по трубам SN 4 очень близки (тепловой поток отличается на 0,7-1%, а температура стенки - на 0,2-0,5%)

## 4. Выводы

### 4.1 Выводы по результатам теплового расчета гладких труб SDR26, SDR21

1. Термическое сопротивление стенки гладкой трубы-оболочки практически не зависит от ее диаметра, а определяется только толщиной стенки (табл. 2);

2. Температурный перепад  $\Delta t_1 = t_{\text{вн.п.тр}} - t_{\text{гр}}$  заметно увеличивается с ростом задаваемого теплового потока для всех диаметров труб (табл.3).

Так, для  $D_{\text{нар}}=110$  мм SDR26 перепад  $\Delta t$  изменяется от  $6,46^{\circ}\text{C}$  (при  $q_1=10$  Вт/м) до  $45,22^{\circ}\text{C}$  ( $q_1=70$  Вт/м);

- для  $D_{\text{нар}}=250$  мм SDR21 перепад  $\Delta t$  изменяется от  $4,97^{\circ}\text{C}$  ( $q_1=10$  Вт/м) до  $49,70^{\circ}\text{C}$  ( $q_1=100$  Вт/м);

3. Разница в температуре стенки труб SDR26 и SDR21 одинакового диаметра не превышает  $0,5^{\circ}\text{C}$  для всех диаметров труб (табл.3);

4. Максимально допустимый тепловой поток (по допустимой температуре стенки трубы):

| $D_{\text{нар}}$ | $q_1$ допус. |
|------------------|--------------|
| 110              | 68           |
| 125              | 71           |
| 140              | 75           |
| 160              | 78           |
| 180              | 81           |
| 200              | 84           |
| 225              | 89           |
| 250              | 92           |

### 4.2. Выводы по результатам теплового расчета гофрированных труб SN8, SN4

1. Термические сопротивления стенка-грунт, подсчитанные по двум методикам, близки по значениям (расхождение не превышает 6%);

2. Термические сопротивления стенка-грунт для гофрированных труб «Электрокор» выше, чем для аналогичных гладких труб SDR26, SDR 21. Превышение составляет от 12 до 19 % в зависимости от диаметра труб и геометрии гофры (в такой же пропорции возрастает и температурный перепад "грунт - внутренняя поверхность стенки" гофрированной трубы);

3. Разница в температуре стенки труб SN8 и SN4 одинакового диаметра не превышает  $0,5^{\circ}\text{C}$  для всех диаметров труб.

## 5. Заключение

Проведенные расчетные исследования теплового режима полиэтиленовых труб при использовании их в качестве кабельных каналов для подземной прокладки показали следующее.

1. Интенсивность теплоотдачи от кабеля в окружающее пространство и тепловой режим трубы зависит от суммы термического сопротивления воздуха в трубе, термического сопротивления самой трубы и термического сопротивления грунта.

2. Доля термического сопротивления гладкой полиэтиленовой трубы весьма незначительна и составляет 2...5% общего термического сопротивления. При этом большие значения относятся к трубам большего диаметра.

3. Доля термического сопротивления полиэтиленовой трубы ЭЛЕКТРОКОР составляет 11...16% общего термического сопротивления, то есть значительно больше. Тем не менее, она мала, и термическое сопротивление трубы ЭЛЕКТРОКОР определяющим все равно не является.

4. Интенсивность теплоотдачи от кабеля в окружающее пространство определяется в основном термическими сопротивлениями грунта и воздушной прослойки между кабелем и трубой.

5. Температура воздуха в трубе, где расположен кабель, превышает температуру внутренней стенки трубы в гладких трубах на 6...10°C, в профилированных - на 8...12°C, то есть всегда существенно выше нормативного значения +25°C, для которого в [1] устанавливается нормативная допустимая нагрузка, поэтому при проверке кабеля по условиям нагрева обязательно применение понижающих коэффициентов, независимо от типа трубы.

6. При выборе сечений кабелей с учетом понижающих коэффициентов температура внутренней стенки гладкой трубы достигает следующих величин.

6.1. Для одного трехжильного кабеля 10...35кВ с бумажной изоляцией 27°C.

6.2. Для одного трехжильного кабеля 10кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена 37...42°C.

6.3. Для одного трехжильного кабеля 20кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена (марки Pirelli -Финляндия) 44...48°C.

6.4. Для одного одножильного кабеля 35кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена 30...36°C.

6.5. Для одного одножильного кабеля 110кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена 33...37°C.

6.6. Для одного одножильного кабеля 220кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена 34...35°C.

6.7. Для трех одножильных кабелей 35кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена 45...52°C.

6.8. Для трех одножильных кабелей 110кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена 48...52°C.

При этом для кабелей Pirelli, а также при прокладке в одной трубе трех кабелей температура воздуха в трубе превышает  $+50^{\circ}\text{C}$ , что предполагает очень значительное снижение допустимого тока, выходящее за рамки [1, табл.1.3.3].

7. При выборе сечений кабелей с учетом понижающих коэффициентов температура внутренней стенки трубы ЭЛЕКТРОКОР составляет.

7.1 Для одного трехжильного кабеля 10...35кВ с бумажной изоляцией в гладких трубах 28...31 $^{\circ}\text{C}$ .

7.2 Для одного трехжильного кабеля 10кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена 39...44 $^{\circ}\text{C}$ .

7.3 Для одного трехжильного кабеля 20кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена (марки Pirelli -Финляндия) 48...49 $^{\circ}\text{C}$ .

7.4 Для одного одножильного кабеля 35кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена 33...39 $^{\circ}\text{C}$ .

7.5 Для одного одножильного кабеля 110кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена 37...38 $^{\circ}\text{C}$ .

7.6 Для одного одножильного кабеля 220кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена 37...38 $^{\circ}\text{C}$ .

7.7 Для трех одножильных кабелей 35кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена 50...54 $^{\circ}\text{C}$ .

7.8 Для трех одножильных кабелей 110кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена 52...56 $^{\circ}\text{C}$ .

При этом для кабелей 10кВ больших сечений с изоляцией из сшитого полиэтилена, кабелей Pirelli, а также при прокладке в одной трубе трех кабелей температура воздуха в трубе превышает  $+50^{\circ}\text{C}$ , что предполагает очень значительное снижение допустимого тока, выходящее за рамки [1, табл.1.3.3].

8. Таким образом, при прокладке в полиэтиленовой трубе как с гладкой стенкой, так и с профилированной стенкой ЭЛЕКТРОКОР одного одно- или трехжильного кабеля температура трубы не превышает  $+50^{\circ}\text{C}$ , и кольцевая прочность трубы гарантирована (при условии правильного выбора сечения кабеля) для всего диапазона напряжений 10...220 кВ.

9. При прокладке в одной трубе трех кабелей температура трубы близка к критической, поэтому кольцевая прочность профилированной трубы ЭЛЕКТРОКОР не может быть гарантирована.

Доцент кафедры  
«Электроснабжение промпредприятий», к.т.н.

И.М. Хусаинов

Доцент кафедры  
«Промышленная теплотехника», к.т.н.

В.Н. Лункин

Гл. специалист НПФ «Градиент-С» СГТУ,  
к.т.н., доцент

Ю.И. Акимов

## 6. Литература

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ)/ Главгосэнергонадзор России. М.: Изд-во ЗАО "Энергосервис", 1998. 610 с.
2. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4-35 кВ и 110-1150 кВ, том III / Под редакцией И.Т.Горюнова, А.А.Любимова – М.: Папирус Про, 2005г. – 640 с.
3. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4-35 кВ и 110-1150 кВ, том IV / Под редакцией И.Т.Горюнова, А.А.Любимова – М.: Папирус Про, 2005г. – 640 с.
4. Справочник по проектированию электрических сетей/ Под.ред. Д.Л.Файбисовича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС,2006.-352 с.:ил.
5. Хижняков С.В. Практические расчеты тепловой изоляции (для промышленного оборудования и трубопроводов).- М.: Энергия, 1976.-198 с.
6. Исаченко В.П. и др. Теплопередача: Учебник для вузов/ В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел.- М.: Энергоиздат. 1981.-416 с.
7. Пособие к СН 550-82 (Пособие по проектированию технологических трубопроводов из пластмассовых труб).

## Приложения

### 1.1 Труба SDR21 (D=110мм); кабель ААШвУ 3х50 10кВ

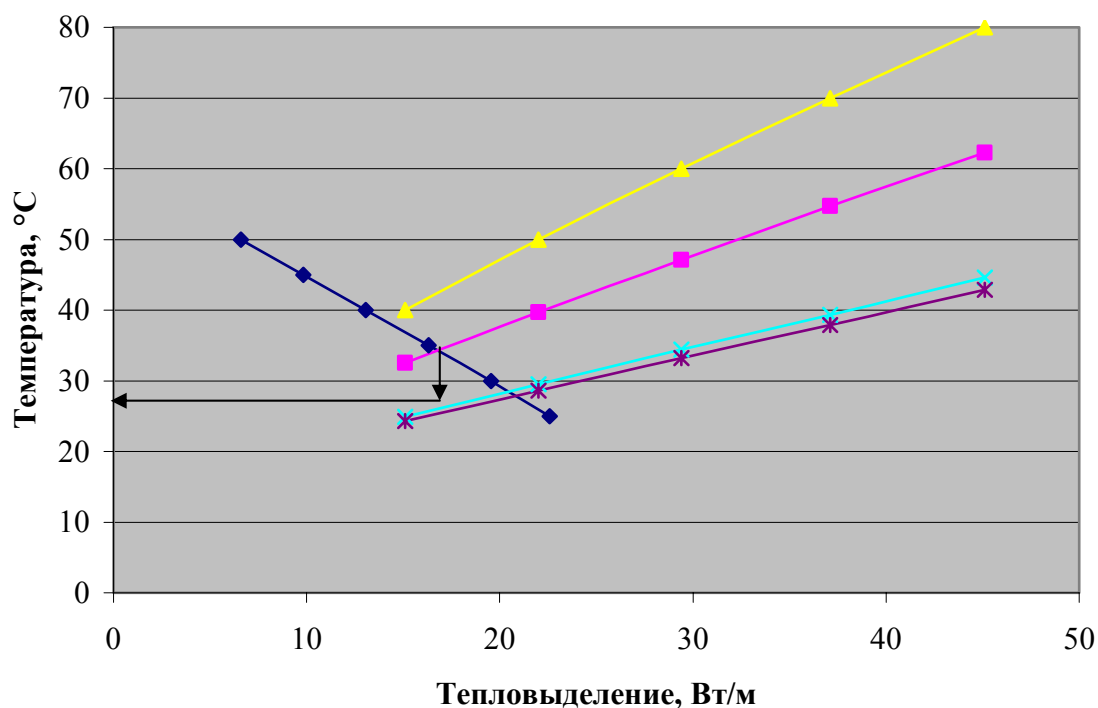
**Таблица 3.1 Тепловыделение кабеля**

|                                  |       |       |       |       |      |      |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45   | 50   |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 22,59 | 19,54 | 16,32 | 13,05 | 9,84 | 6,59 |

**Таблица 3.2 Результаты теплового расчета трубы**

|   |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С | 40     | 50     | 60     | 70     | 80     |
| Линейное термическое сопротивление грунта, м·К/Вт | 0,619  |        |        |        |        |
| Линейное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт  | 0,0375 |        |        |        |        |
| Терм, сопротивление воздушной прослойки, м·К/Вт   | 1,0012 | 0,9326 | 0,8766 | 0,8284 | 0,7855 |
| Суммарное термическое сопротивление, м·К/Вт       | 1,6573 | 1,5887 | 1,5327 | 1,4845 | 1,4416 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С      | 24,9   | 29,5   | 34,3   | 39,3   | 44,6   |
| Температура наружной поверхности трубы, °С        | 24,3   | 28,6   | 33,2   | 37,9   | 42,9   |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м         | 15,085 | 22,031 | 29,360 | 37,050 | 45,090 |
| Коэффициент конвекции                             | 2,528  | 2,655  | 2,732  | 2,778  | 2,803  |
| Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/м·К  | 0,157  | 0,169  | 0,180  | 0,190  | 0,200  |
| Эффективная толщина воздушной прослойки, м        | 0,312  |        |        |        |        |
| Средняя температура воздуха в прослойке, °С       | 32,5   | 39,7   | 47,1   | 54,7   | 62,3   |

**График температурного режима**



- ◆— Температура среды, в которой находится кабель
- Средняя температура воздуха в трубе
- ▲— Температура поверхности источника тепла
- ×— Температура внутренней поверхности трубы
- \*— Температура наружной поверхности трубы

Расчетная температура стенки трубы ..., 27 °С

## 1.2 Труба SDR21 (D=125мм); Кабель ААШвУ 3х240 10кВ

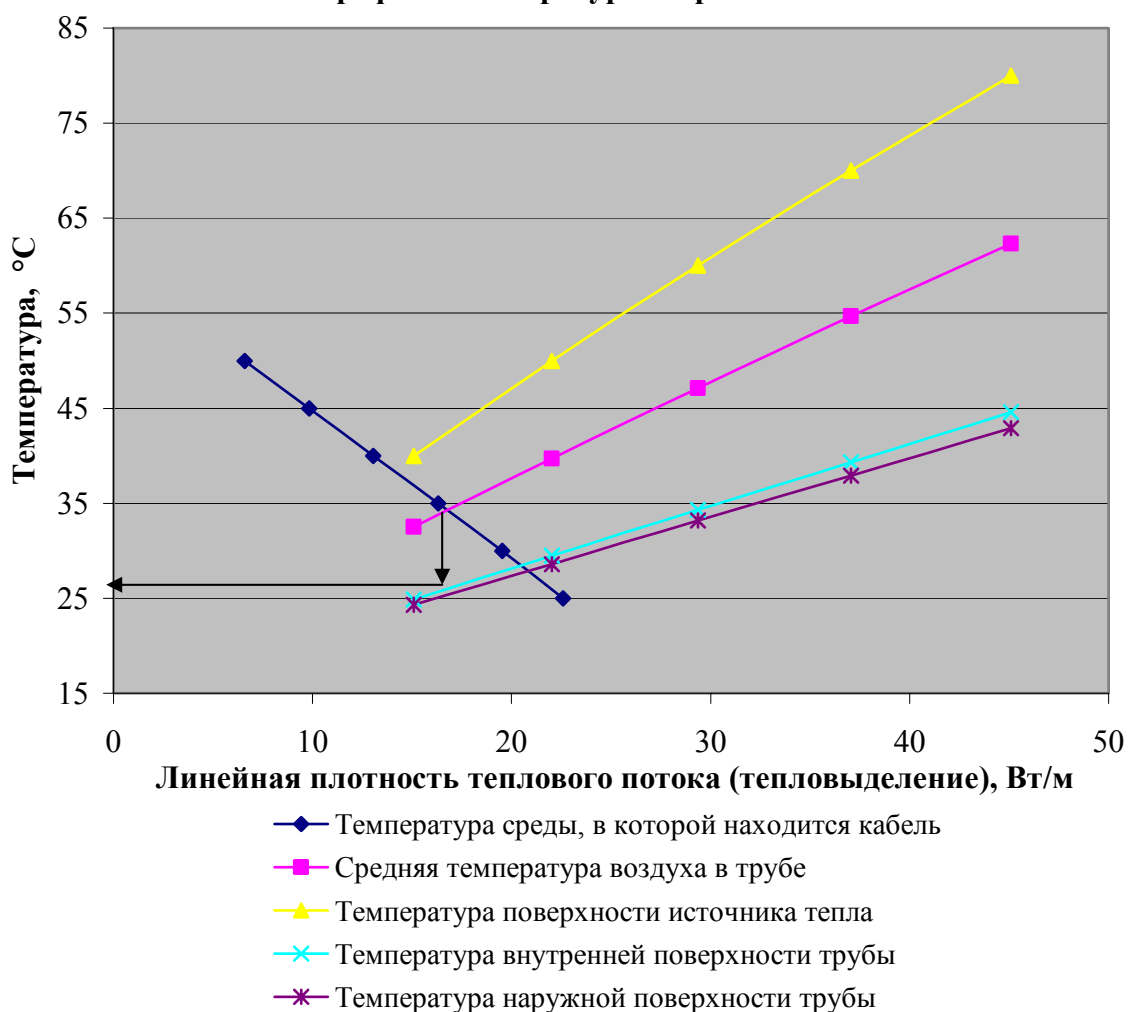
**Таблица 3.3 Тепловыделение кабеля**

|                                  |       |       |       |       |       |      |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50   |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 31,06 | 26,86 | 22,44 | 17,04 | 13,53 | 9,06 |

**Таблица 3.4 Результаты теплового расчета трубы**

|   |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С | 40     | 50     | 60     | 70     | 80     |
| Линейное термическое сопротивление грунта, м·К/Вт | 0,594  |        |        |        |        |
| Линейное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт  | 0,0374 |        |        |        |        |
| Терм, сопротивление воздушной прослойки, м·К/Вт   | 0,7291 | 0,6783 | 0,6363 | 0,5997 | 0,5670 |
| Суммарное термическое сопротивление, м·К/Вт       | 1,3606 | 1,3098 | 1,2678 | 1,2312 | 1,1985 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С      | 26,6   | 31,9   | 37,4   | 43,2   | 49,2   |
| Температура наружной поверхности трубы, °С        | 25,9   | 30,9   | 36,1   | 41,5   | 47,2   |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м         | 18,374 | 26,722 | 35,496 | 44,672 | 54,236 |
| Коэффициент конвекции                             | 2,345  | 2,456  | 2,521  | 2,557  | 2,573  |
| Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/м·К  | 0,161  | 0,173  | 0,185  | 0,196  | 0,207  |
| Эффективная толщина воздушной прослойки, м        | 0,0295 |        |        |        |        |
| Средняя температура воздуха в прослойке, °С       | 33,3   | 40,9   | 48,7   | 56,6   | 64,6   |

**Графики температурного режима**



Расчетная температура стенки трубы ..., 27 °С



### 1.3 Труба SDR21 (D=160мм); кабель АПвПУ 1x185/35-110кВ

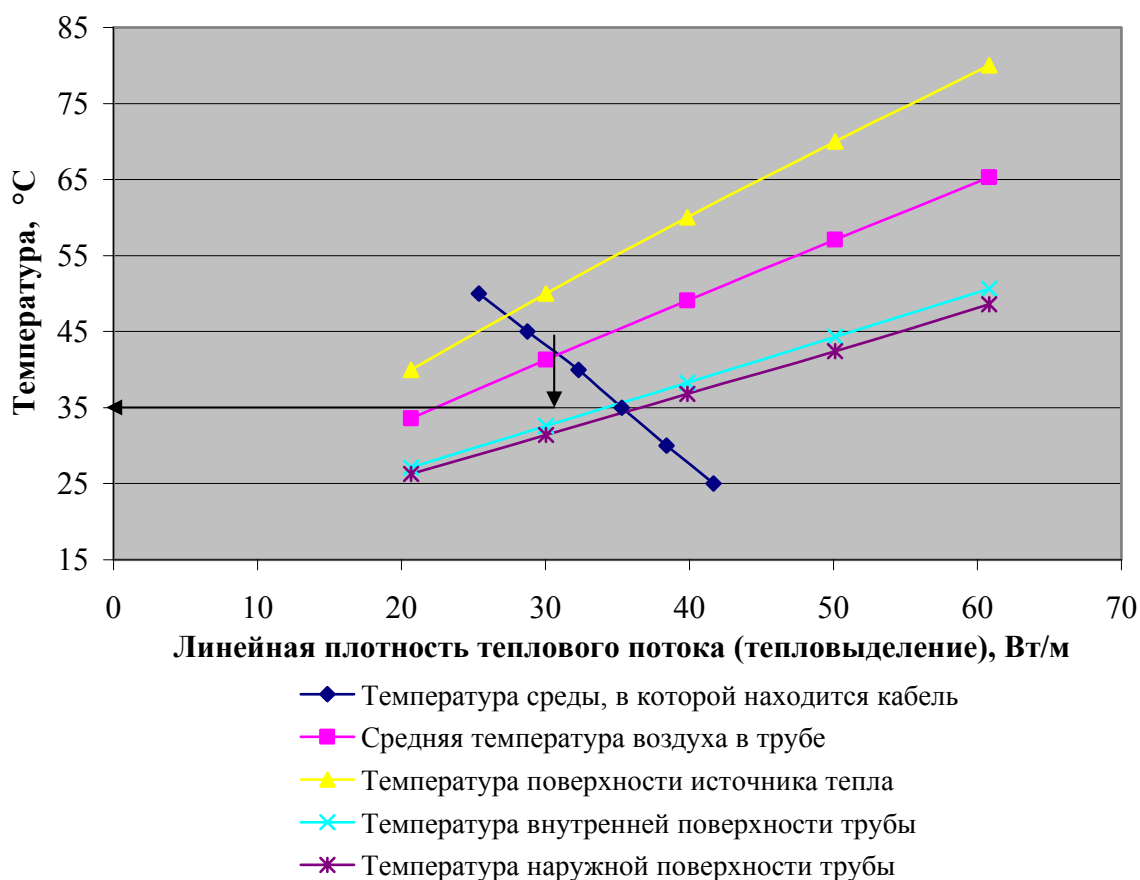
**Таблица 3.5 Тепловыделение кабеля**

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 41,68 | 38,41 | 35,28 | 32,28 | 28,75 | 25,36 |

**Таблица 3.6 Результаты теплового расчета трубы**

|   |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С | 40     | 50     | 60     | 70     | 80     |
| Линейное термическое сопротивление грунта, м·К/Вт | 0,5469 |        |        |        |        |
| Линейное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт  | 0,0375 |        |        |        |        |
| Терм, сопротивление воздушной прослойки, м·К/Вт   | 0,6249 | 0,5811 | 0,5447 | 0,5131 | 0,4847 |
| Суммарное термическое сопротивление, м·К/Вт       | 1,2093 | 1,1655 | 1,1292 | 1,0975 | 1,0691 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С      | 27,1   | 32,6   | 38,3   | 44,3   | 50,6   |
| Температура наружной поверхности трубы, °С        | 26,3   | 31,4   | 36,8   | 42,4   | 48,6   |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м         | 20,673 | 30,029 | 39,852 | 50,115 | 60,806 |
| Коэффициент конвекции                             | 2,9325 | 3,0695 | 3,1487 | 3,1917 | 3,2101 |
| Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/м·К  | 0,208  | 0,223  | 0,238  | 0,253  | 0,268  |
| Эффективная толщина воздушной прослойки, м        | 0,0403 |        |        |        |        |
| Средняя температура воздуха в прослойке, °С       | 33,6   | 41,3   | 49,1   | 57,1   | 65,3   |

#### Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы ..., 33 °С

## 1.4 Труба SDR21 (D=110мм); кабель АПвПУ 3х50/16-10кВ

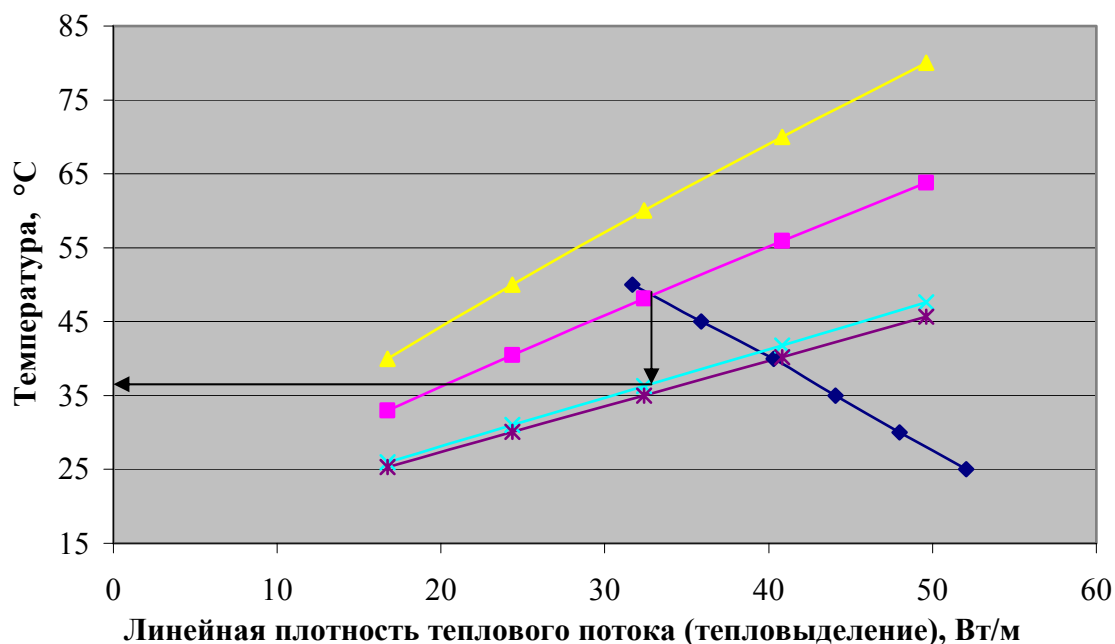
**Таблица 3.7 Тепловыделение кабеля**

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 41,68 | 38,41 | 35,28 | 32,28 | 28,75 | 25,36 |

**Таблица 3.8 Результаты теплового расчета трубы**

|   |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С | 40     | 50     | 60     | 70     | 80     |
| Линейное термическое сопротивление грунта, м·К/Вт | 0,5469 |        |        |        |        |
| Линейное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт  | 0,0375 |        |        |        |        |
| Терм, сопротивление воздушной прослойки, м·К/Вт   | 0,6249 | 0,5811 | 0,5447 | 0,5131 | 0,4847 |
| Суммарное термическое сопротивление, м·К/Вт       | 1,2093 | 1,1655 | 1,1292 | 1,0975 | 1,0691 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С      | 27,1   | 32,6   | 38,3   | 44,3   | 50,6   |
| Температура наружной поверхности трубы, °С        | 26,3   | 31,4   | 36,8   | 42,4   | 48,6   |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м         | 20,673 | 30,029 | 39,852 | 50,115 | 60,806 |
| Коэффициент конвекции                             | 2,9325 | 3,0695 | 3,1487 | 3,1917 | 3,2101 |
| Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/м·К  | 0,208  | 0,223  | 0,238  | 0,253  | 0,268  |
| Эффективная толщина воздушной прослойки, м        | 0,0403 |        |        |        |        |
| Средняя температура воздуха в прослойке, °С       | 33,6   | 41,3   | 49,1   | 57,1   | 65,3   |

**Графики температурного режима**



- ◆ Температура среды, в которой находится кабель
- Средняя температура воздуха в трубе
- ▲ Температура поверхности источника тепла
- ✕ Температура внутренней поверхности трубы
- ✱ Температура наружной поверхности трубы

**Расчетная температура стенки трубы ..., 37 °С**

## 1.5 Труба SDR21 (D=110мм); кабель АПвПУ 1х50/16-35кВ

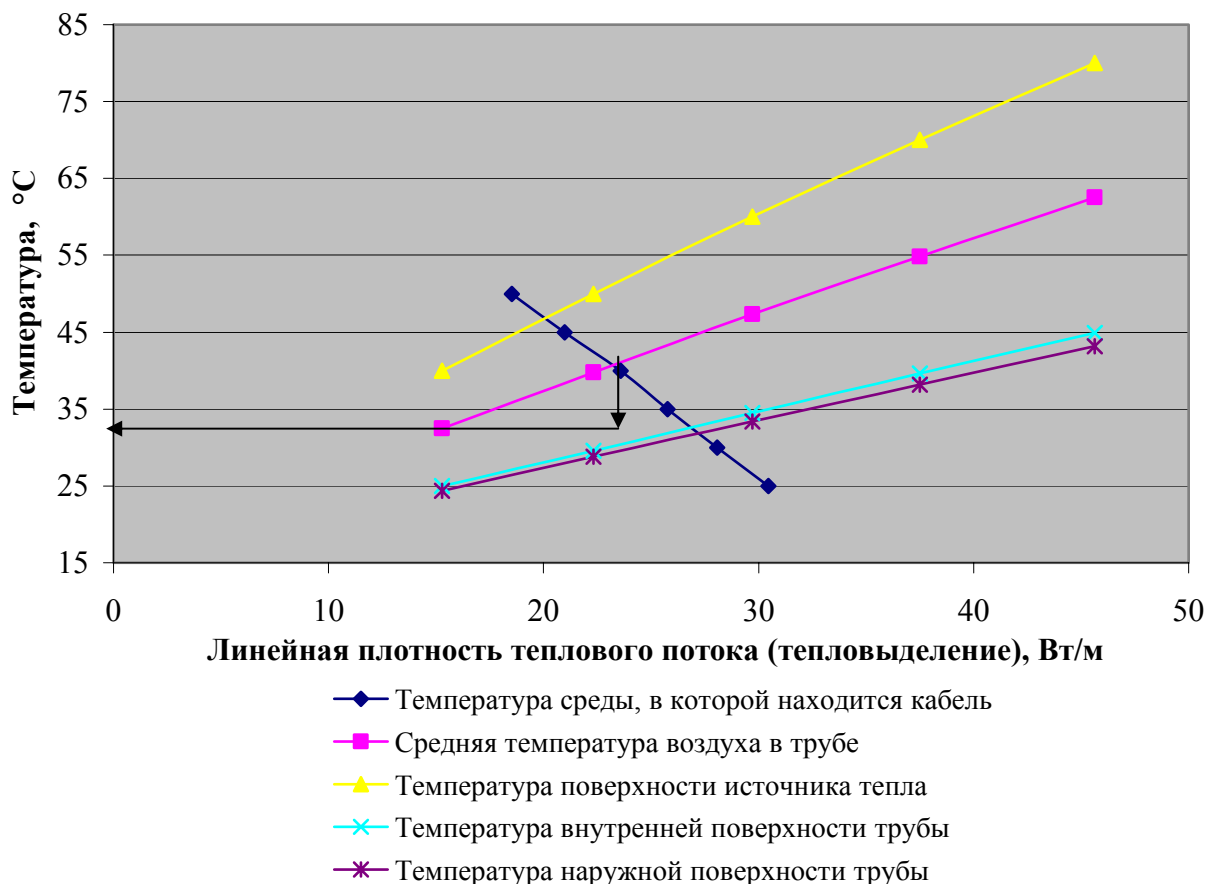
**Таблица 3.9 Тепловыделение кабеля**

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 30,46 | 28,07 | 25,78 | 23,58 | 20,98 | 18,53 |

**Таблица 3.10 Результаты теплового расчета трубы**

|   |        |       |       |       |       |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Линейное термическое сопротивление грунта, м·К/Вт | 0,6185 |       |       |       |       |
| Линейное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт  | 0,0375 |       |       |       |       |
| Терм, сопротивление воздушной прослойки, м·К/Вт   | 0,980  | 0,913 | 0,858 | 0,811 | 0,768 |
| Суммарное термическое сопротивление, м·К/Вт       | 1,636  | 1,569 | 1,514 | 1,467 | 1,425 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С      | 25,0   | 29,6  | 34,5  | 39,6  | 44,9  |
| Температура наружной поверхности трубы, °С        | 24,4   | 28,8  | 33,4  | 38,2  | 43,2  |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м         | 15,28  | 22,31 | 29,72 | 37,50 | 45,63 |
| Коэффициент конвекции                             | 2,49   | 2,62  | 2,69  | 2,74  | 2,76  |
| Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/м·К  | 0,156  | 0,168 | 0,178 | 0,189 | 0,199 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки, м        | 0,0307 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в прослойке, °С       | 32,5   | 39,8  | 47,3  | 54,8  | 62,5  |

### Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы ..., 30 °С

## 1.6 Труба SDR21 (D=160мм); кабель АПВПУ 1х800/35-35кВ

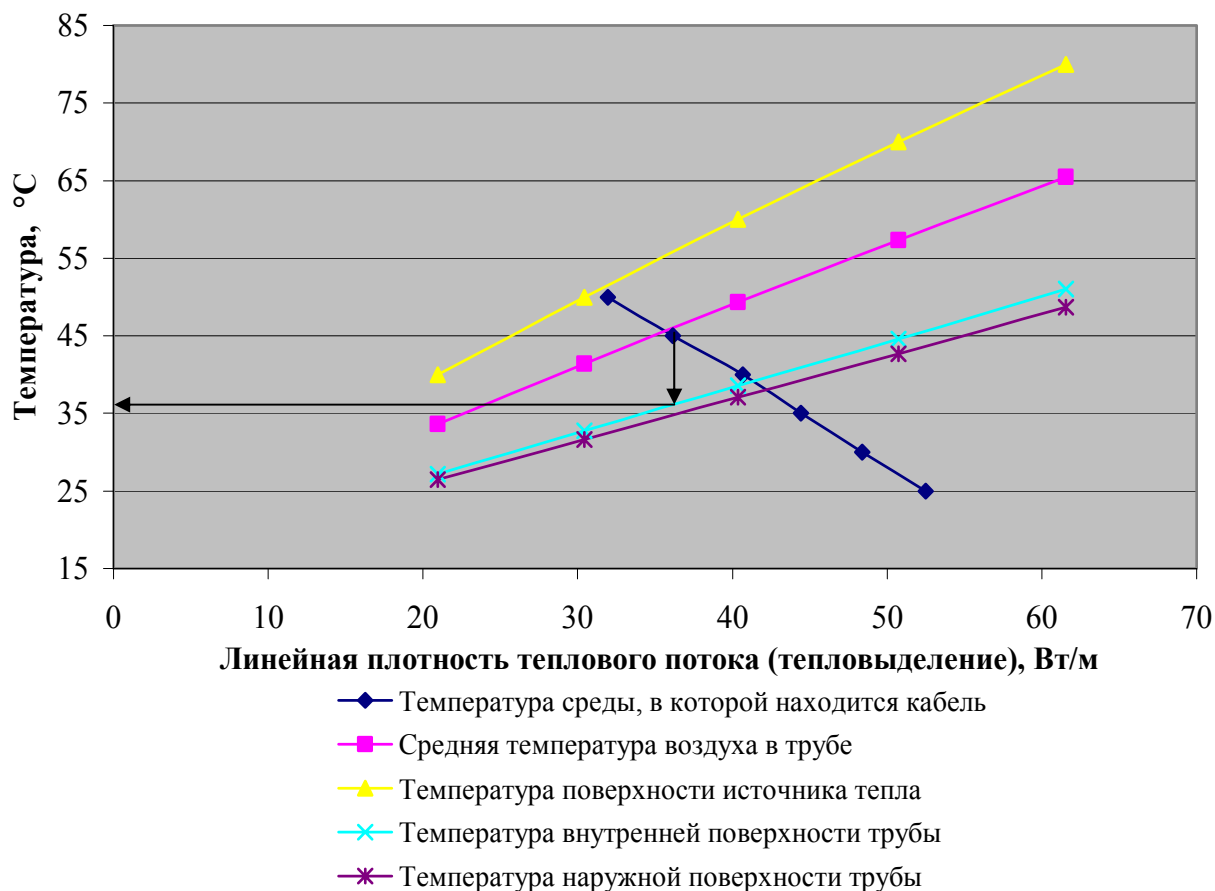
**Таблица 3.11 Тепловыделение кабеля**

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 52,50 | 48,39 | 44,44 | 40,66 | 36,17 | 31,94 |

**Таблица 3.12 Результаты теплового расчета трубы**

|   |        |       |       |       |       |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Линейное термическое сопротивление грунта, м·К/Вт | 0,547  |       |       |       |       |
| Линейное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт  | 0,0375 |       |       |       |       |
| Терм, сопротивление воздушной прослойки, м·К/Вт   | 0,609  | 0,566 | 0,531 | 0,450 | 0,472 |
| Суммарное термическое сопротивление, м·К/Вт       | 1,193  | 1,151 | 1,115 | 1,084 | 1,056 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С      | 27,2   | 32,8  | 38,6  | 44,6  | 51,0  |
| Температура наружной поверхности трубы, °С        | 26,5   | 31,6  | 37,1  | 42,7  | 48,7  |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м         | 20,95  | 30,42 | 40,36 | 50,73 | 61,54 |
| Коэффициент конвекции                             | 2,87   | 3,00  | 3,08  | 3,12  | 3,14  |
| Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/м·К  | 0,205  | 0,221 | 0,235 | 0,250 | 0,265 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки, м        | 0,0393 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в прослойке, °С       | 33,6   | 41,4  | 49,3  | 57,3  | 65,5  |

### Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы ..., 36 °С

## 1.7 Труба SDR21 (D=160мм); кабель АНХАМК-W 3x70/35-20кВ

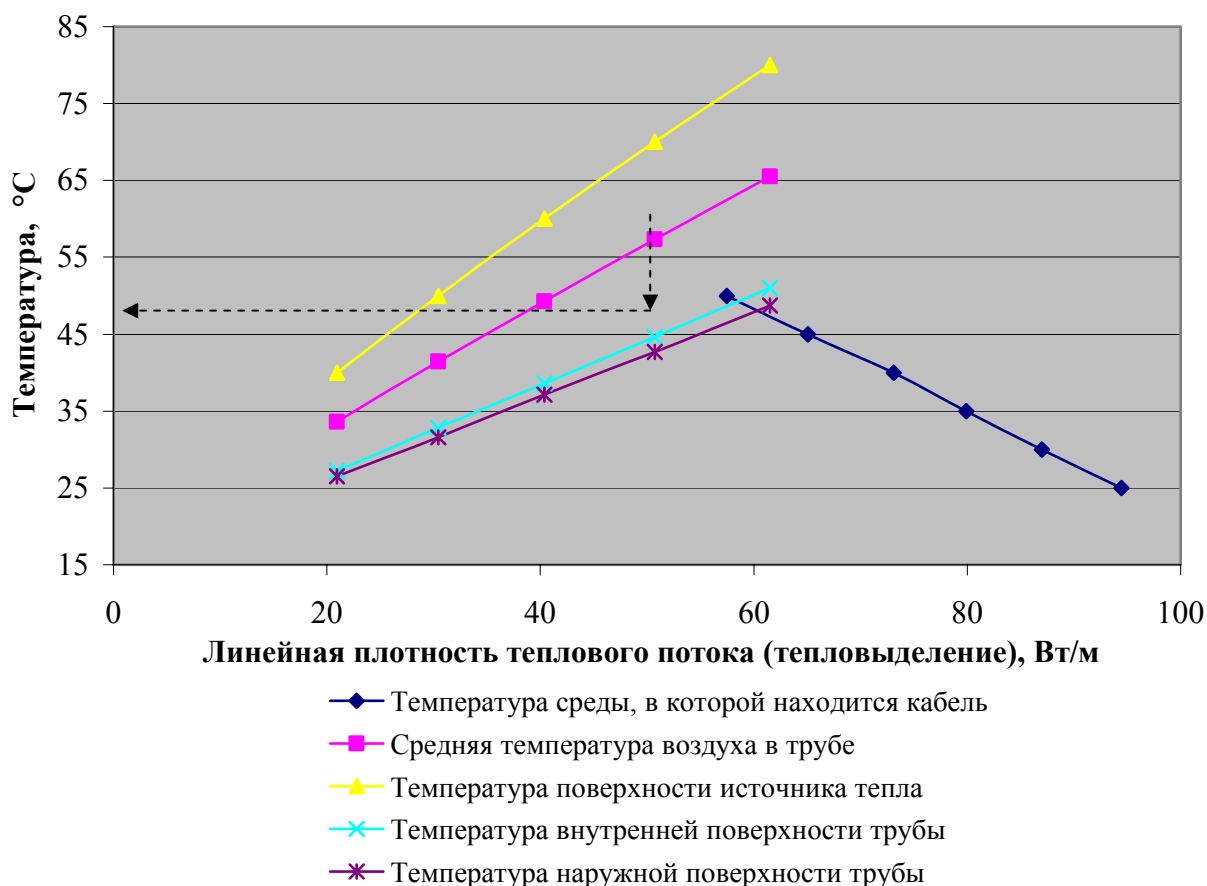
**Таблица 3.13 Тепловыделение кабеля**

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 94,43 | 87,03 | 79,93 | 73,13 | 65,06 | 57,45 |

**Таблица 3.14 Результаты теплового расчета трубы**

|   |        |       |       |       |       |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Линейное термическое сопротивление грунта, м·К/Вт | 0,5469 |       |       |       |       |
| Линейное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт  | 0,0375 |       |       |       |       |
| Терм, сопротивление воздушной прослойки, м·К/Вт   | 0,609  | 0,566 | 0,531 | 0,500 | 0,472 |
| Суммарное термическое сопротивление, м·К/Вт       | 1,193  | 1,151 | 1,115 | 1,084 | 1,056 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С      | 27,2   | 32,8  | 38,6  | 44,6  | 51,0  |
| Температура наружной поверхности трубы, °С        | 26,5   | 31,6  | 37,1  | 42,7  | 48,7  |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м         | 20,95  | 30,42 | 40,4  | 50,73 | 61,54 |
| Коэффициент конвекции                             | 2,87   | 3,00  | 3,08  | 3,12  | 3,14  |
| Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/м·К  | 0,205  | 0,221 | 0,235 | 0,250 | 0,265 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки, м        | 0,0393 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в прослойке, °С       | 33,6   | 41,4  | 49,3  | 57,3  | 65,5  |

**Графики температурного режима**



**Графики температуры среды, где находится кабель, и средней температуры воздуха в прослойке не пересекаются. Расчетная температура стенки трубы ... 44 °С**

## 1.8 Труба SDR21 (D=160мм); кабель АПВПУ 3х240/25-10кВ

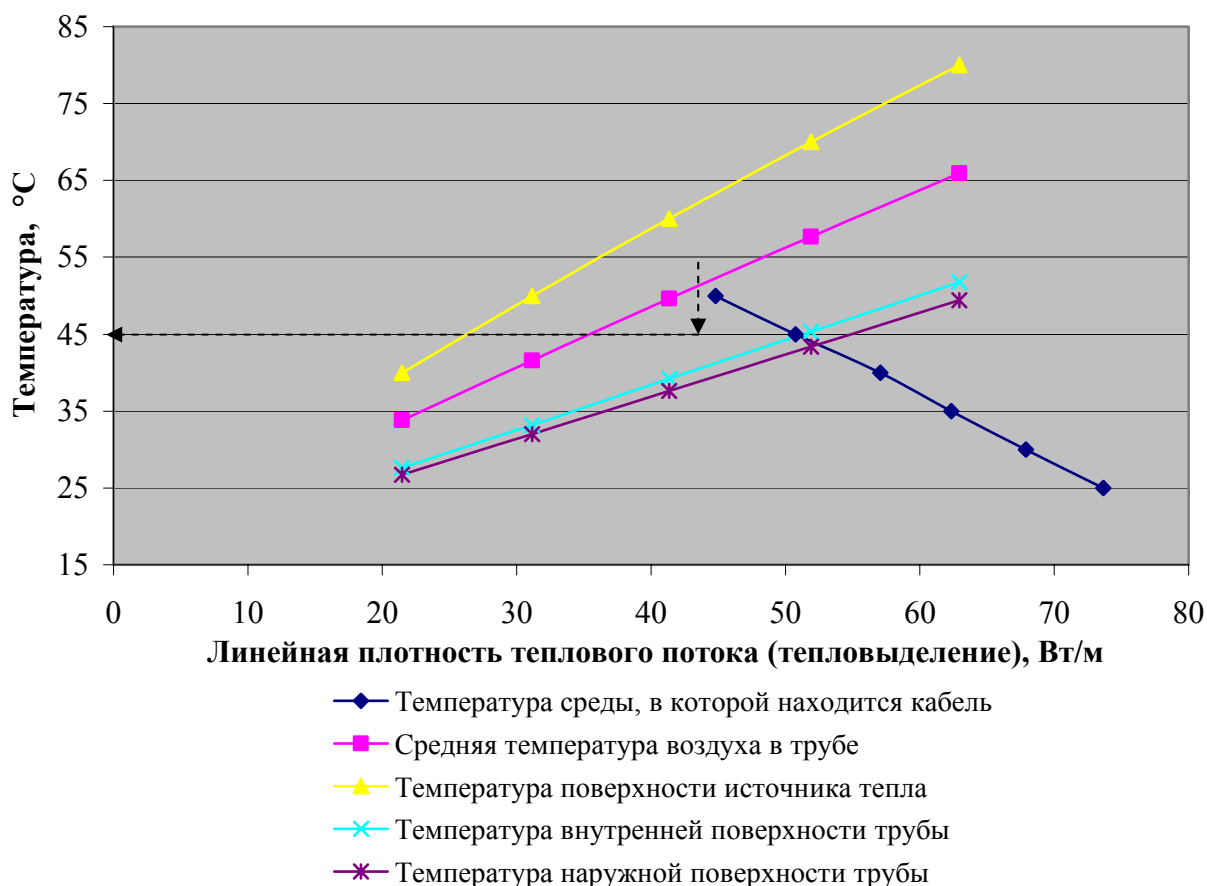
**Таблица 3.15 Тепловыделение кабеля**

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 73,67 | 67,90 | 62,36 | 57,05 | 50,75 | 44,82 |

**Таблица 3.16 Результаты теплового расчета трубы**

|   |        |       |       |       |       |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Линейное термическое сопротивление грунта, м·К/Вт | 0,5469 |       |       |       |       |
| Линейное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт  | 0,0375 |       |       |       |       |
| Терм, сопротивление воздушной прослойки, м·К/Вт   | 0,580  | 0,538 | 0,504 | 0,475 | 0,448 |
| Суммарное термическое сопротивление, м·К/Вт       | 1,164  | 1,123 | 1,089 | 1,059 | 1,033 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С      | 27,6   | 33,2  | 39,2  | 45,3  | 51,8  |
| Температура наружной поверхности трубы, °С        | 26,7   | 32,0  | 37,6  | 43,4  | 49,4  |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м         | 21,48  | 31,17 | 41,33 | 51,92 | 62,95 |
| Коэффициент конвекции                             | 2,74   | 2,86  | 2,94  | 2,97  | 2,99  |
| Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/м·К  | 0,199  | 0,214 | 0,229 | 0,243 | 0,258 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки, м        | 0,0373 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в прослойке, °С       | 33,8   | 41,6  | 49,6  | 57,7  | 65,9  |

**Графики температурного режима**



Графики температуры среды, где находится кабель, и средней температуры воздуха в прослойке не пересекаются. Расчетная температура стенки трубы ... 42 °С

## 1.9 Труба SDR21 (D=200мм); кабель АПвПУ 1x1000/35-110кВ

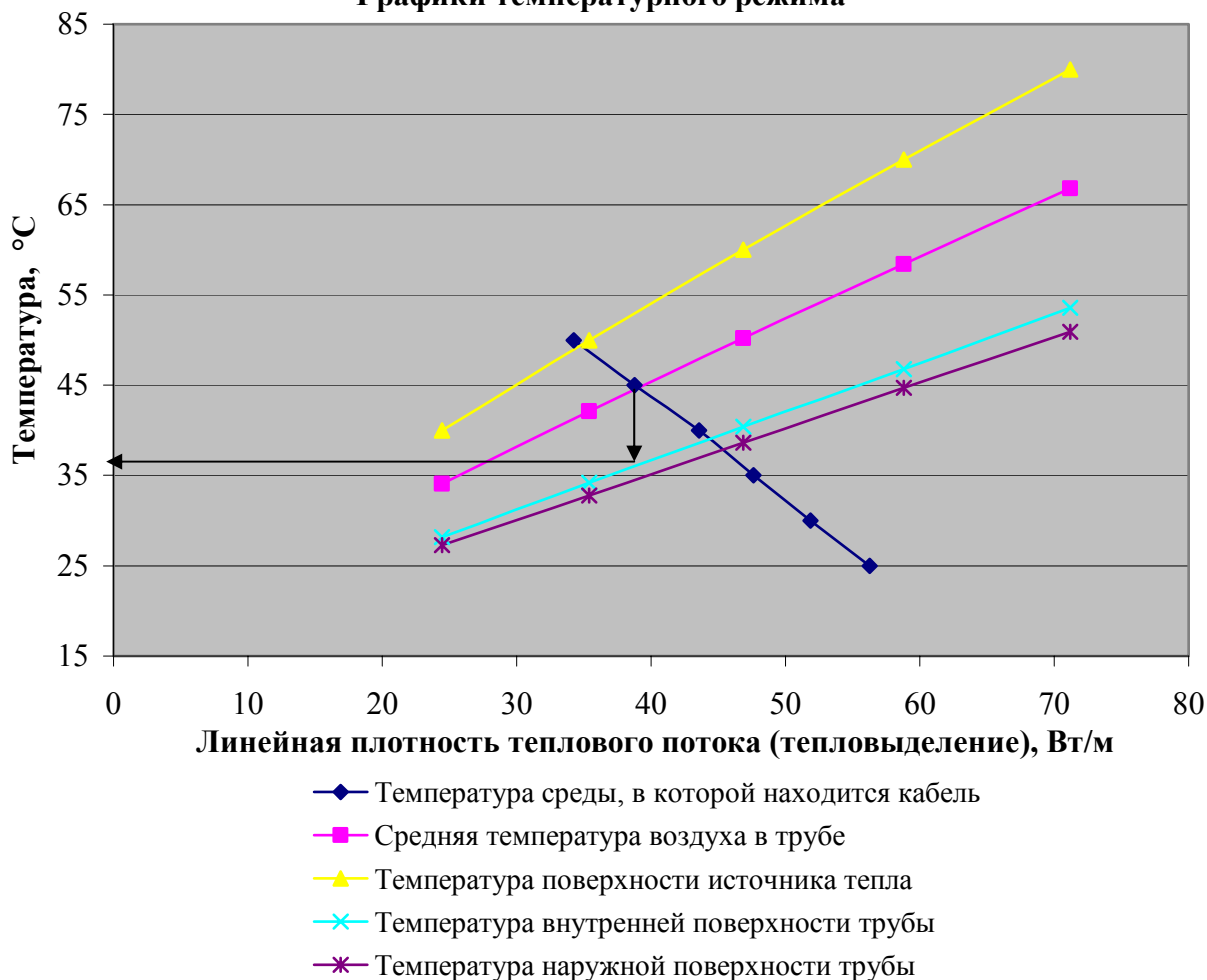
**Таблица 3.17 Тепловыделение кабеля**

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 56,27 | 51,86 | 47,63 | 43,58 | 38,76 | 34,23 |

**Таблица 3.18 Результаты теплового расчета трубы**

|   |        |       |       |       |       |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Линейное термическое сопротивление грунта, м·К/Вт | 0,5043 |       |       |       |       |
| Линейное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт  | 0,0374 |       |       |       |       |
| Терм, сопротивление воздушной прослойки, м·К/Вт   | 0,482  | 0,447 | 0,419 | 0,394 | 0,371 |
| Суммарное термическое сопротивление, м·К/Вт       | 1,023  | 0,989 | 0,960 | 0,935 | 0,913 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С      | 28,2   | 34,2  | 40,4  | 46,8  | 53,6  |
| Температура наружной поверхности трубы, °С        | 27,3   | 32,8  | 38,6  | 44,7  | 50,9  |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м         | 24,43  | 35,38 | 46,85 | 58,80 | 71,21 |
| Коэффициент конвекции                             | 3,23   | 3,37  | 3,45  | 3,50  | 3,51  |
| Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/м·К  | 0,246  | 0,264 | 0,283 | 0,301 | 0,319 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки, м        | 0,047  |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в прослойке, °С       | 34,1   | 42,1  | 50,2  | 58,4  | 66,8  |

**Графики температурного режима**



Расчетная температура стенки трубы ... 37 °С

### 1.10 Труба SDR21 (D=200 мм); кабель АНХАМК-W 3x240/70-20кВ

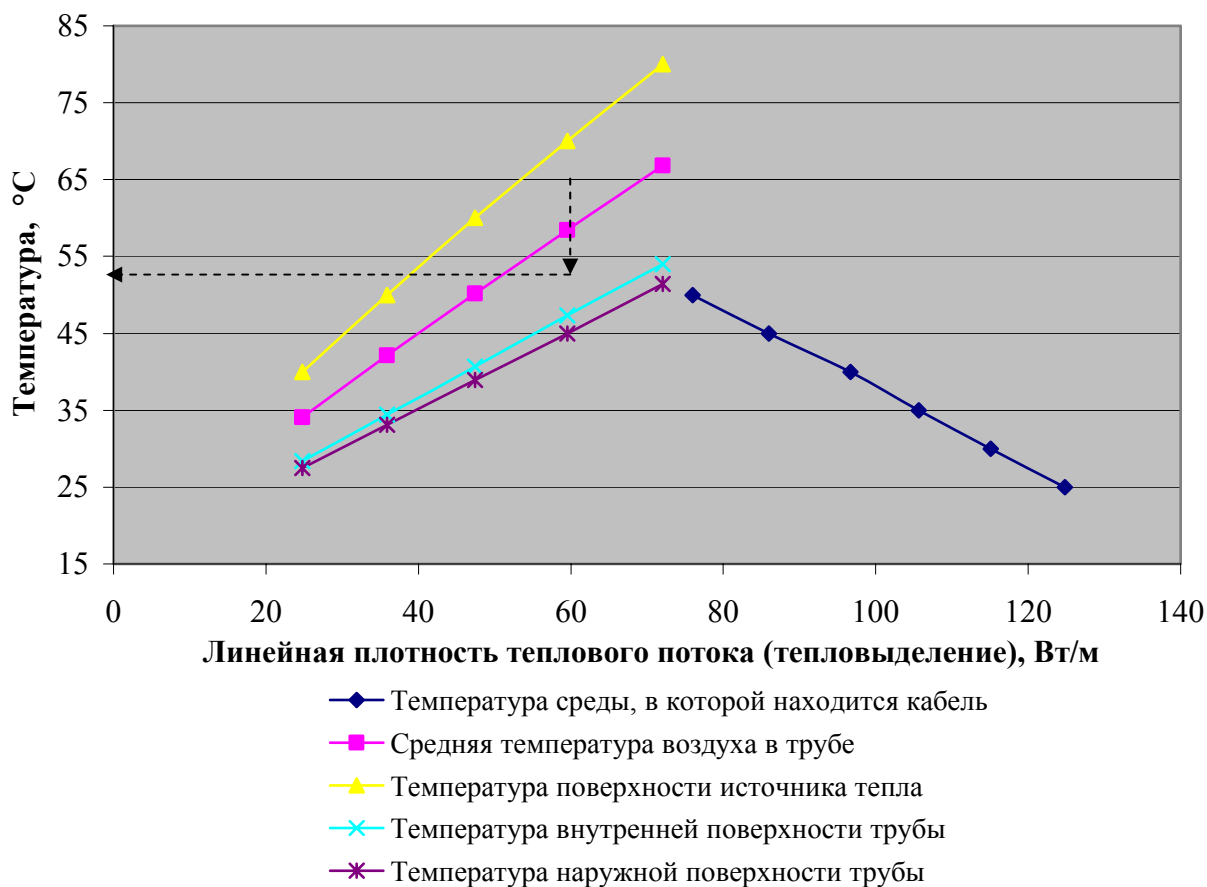
**Таблица 3.19 Тепловыделение кабеля**

|                                  |        |        |        |       |       |       |
|----------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25     | 30     | 35     | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 124,85 | 115,06 | 105,67 | 96,68 | 86,01 | 75,96 |

**Таблица 3.20 Результаты теплового расчета трубы**

|   |        |       |       |       |       |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Линейное термическое сопротивление грунта, м·К/Вт | 0,5043 |       |       |       |       |
| Линейное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт  | 0,0374 |       |       |       |       |
| Терм, сопротивление воздушной прослойки, м·К/Вт   | 0,468  | 0,434 | 0,406 | 0,382 | 0,360 |
| Суммарное термическое сопротивление, м·К/Вт       | 1,009  | 0,976 | 0,948 | 0,924 | 0,902 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С      | 28,4   | 34,4  | 40,7  | 47,3  | 54,0  |
| Температура наружной поверхности трубы, °С        | 27,5   | 33,1  | 38,9  | 45,0  | 51,4  |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м         | 24,77  | 35,86 | 47,46 | 59,54 | 72,09 |
| Коэффициент конвекции                             | 3,14   | 3,28  | 3,36  | 3,39  | 3,41  |
| Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/м·К  | 0,241  | 0,260 | 0,278 | 0,295 | 0,313 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки, м        | 0,0459 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в прослойке, °С       | 34,2   | 42,2  | 50,4  | 58,6  | 67,0  |

#### Графики температурного режима



Графики температуры среды, где находится кабель, и средней температуры воздуха в прослойке не пересекаются. Расчетная температура стенки трубы ... 48 °С



## 1.11 Труба SDR21 (D=250 мм); кабель АПвПУ 1х630/150-220кВ

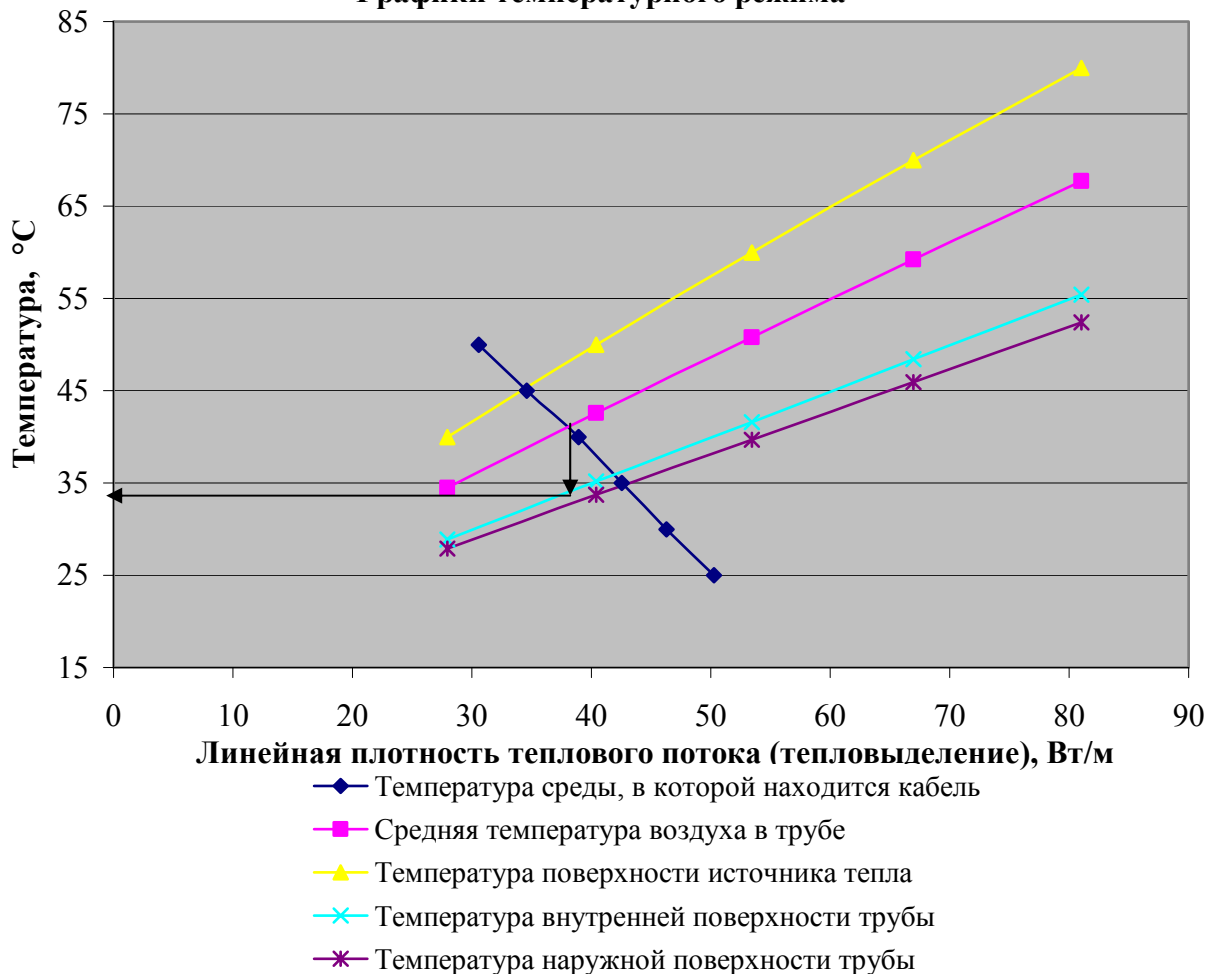
**Таблица 3.21 Тепловыделение кабеля**

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 50,25 | 46,31 | 42,53 | 38,92 | 34,62 | 30,57 |

**Таблица 3.22 Результаты теплового расчета трубы**

|   |        |       |       |       |       |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Линейное термическое сопротивление грунта, м·К/Вт | 0,4617 |       |       |       |       |
| Линейное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт  | 0,0370 |       |       |       |       |
| Терм, сопротивление воздушной прослойки, м·К/Вт   | 0,396  | 0,367 | 0,344 | 0,323 | 0,304 |
| Суммарное термическое сопротивление, м·К/Вт       | 0,895  | 0,866 | 0,842 | 0,821 | 0,802 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С      | 28,9   | 35,2  | 41,6  | 48,4  | 55,4  |
| Температура наружной поверхности трубы, °С        | 27,9   | 33,7  | 39,7  | 45,9  | 52,4  |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м         | 27,95  | 40,41 | 53,43 | 66,97 | 81,01 |
| Коэффициент конвекции                             | 3,77   | 3,93  | 4,02  | 4,07  | 4,08  |
| Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/м·К  | 0,301  | 0,324 | 0,347 | 0,370 | 0,392 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки, м        | 0,0596 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в прослойке, °С       | 34,5   | 42,58 | 50,8  | 59,2  | 67,7  |

**Графики температурного режима**



Расчетная температура стенки трубы ... 34 °С

## 1.12 Труба SDR21 (D=250 мм); кабель АПвПУ 1х1000/150-220кВ

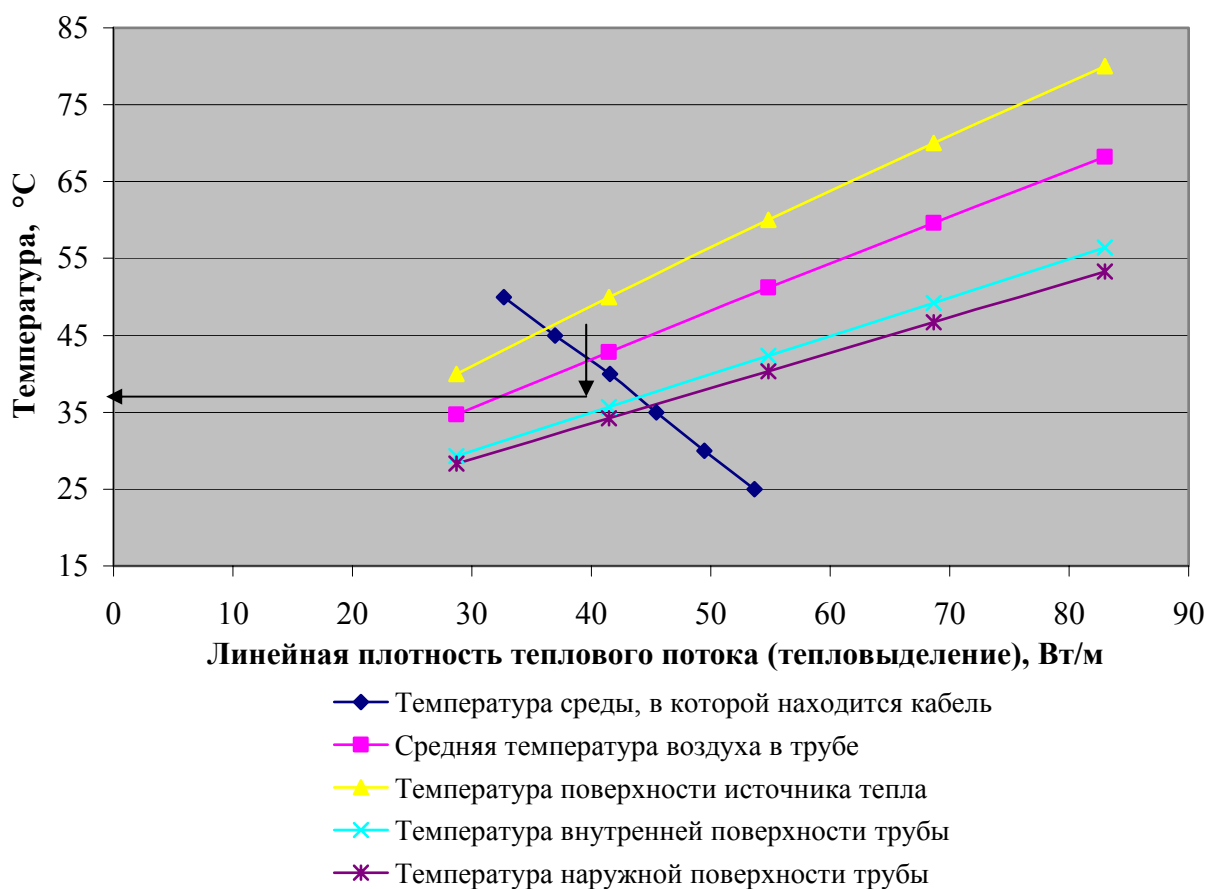
**Таблица 3.23 Тепловыделение кабеля**

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 53,68 | 49,47 | 45,43 | 41,57 | 36,98 | 32,66 |

**Таблица 3.24 Результаты теплового расчета трубы**

|   |        |       |       |       |       |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Линейное термическое сопротивление грунта, м·К/Вт | 0,4617 |       |       |       |       |
| Линейное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт  | 0,0370 |       |       |       |       |
| Терм, сопротивление воздушной прослойки, м·К/Вт   | 0,372  | 0,345 | 0,322 | 0,302 | 0,285 |
| Суммарное термическое сопротивление, м·К/Вт       | 0,871  | 0,844 | 0,821 | 0,801 | 0,783 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С      | 29,3   | 35,7  | 42,3  | 49,2  | 56,4  |
| Температура наружной поверхности трубы, °С        | 28,3   | 34,2  | 40,3  | 46,7  | 53,3  |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м         | 28,72  | 41,48 | 54,80 | 68,64 | 82,98 |
| Коэффициент конвекции                             | 3,54   | 3,70  | 3,78  | 3,82  | 3,83  |
| Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/м·К  | 0,290  | 0,312 | 0,334 | 0,356 | 0,378 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки, м        | 0,0556 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в прослойке, °С       | 34,7   | 42,8  | 51,2  | 59,6  | 68,2  |

### Графики температурного режима



**Расчетная температура стенки трубы ... 35 °С**

### 1.13 Труба гладкая SDR21 (D=125мм); кабель 3\*АПвПу 1x50/16 – 35кВ

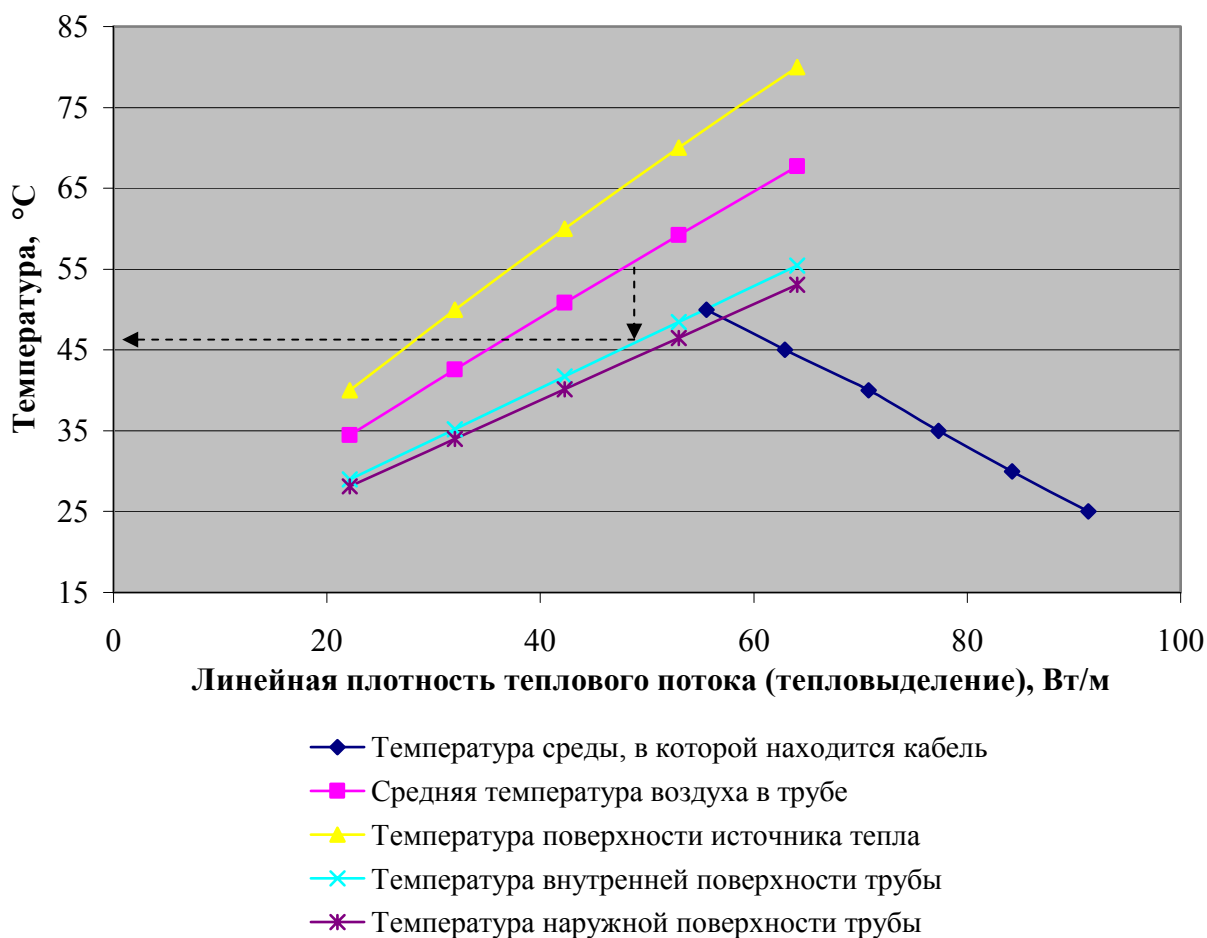
**Таблица 3.25 Тепловыделение кабеля**

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 91,37 | 84,20 | 77,33 | 70,75 | 62,94 | 55,59 |

**Таблица 3.26 Результаты теплового расчета трубы**

|   |        |       |       |       |       |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, $t_1, ^\circ\text{C}$  | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Линейное термическое сопротивление грунта, м·К/Вт                     | 0,5941 |       |       |       |       |
| Линейное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт                      | 0,0374 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт                  | 0,498  | 0,463 | 0,433 | 0,407 | 0,383 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт                     | 1,300  | 1,094 | 1,064 | 1,038 | 1,015 |
| Температура внутренней поверхности трубы, $t_2, ^\circ\text{C}$       | 28,99  | 35,21 | 41,71 | 48,46 | 55,45 |
| Температура наружной поверхности трубы, $t_3, ^\circ\text{C}$         | 28,15  | 34,01 | 40,12 | 46,47 | 53,05 |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м                             | 22,13  | 31,99 | 42,28 | 52,98 | 64,05 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки                             | 1,371  | 1,431 | 1,464 | 1,480 | 1,485 |
| Эффективный коэффициент теплопроводности воздушной прослойки, Вт/м·К  | 0,102  | 0,110 | 0,118 | 0,126 | 0,133 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки, м                            | 0,0155 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, $t_{\text{воз}}, ^\circ\text{C}$ | 34,49  | 42,60 | 50,85 | 59,23 | 67,72 |

**Графики температурного режима**



Графики температуры среды, где находится кабель, и средней температуры воздуха в прослойке не пересекаются. Расчетная температура стенки трубы .... 45,3°C

### 1.14 Труба гладкая SDR21 (D=200мм); кабель 3\*АПвПу 1х800/35-35кВ

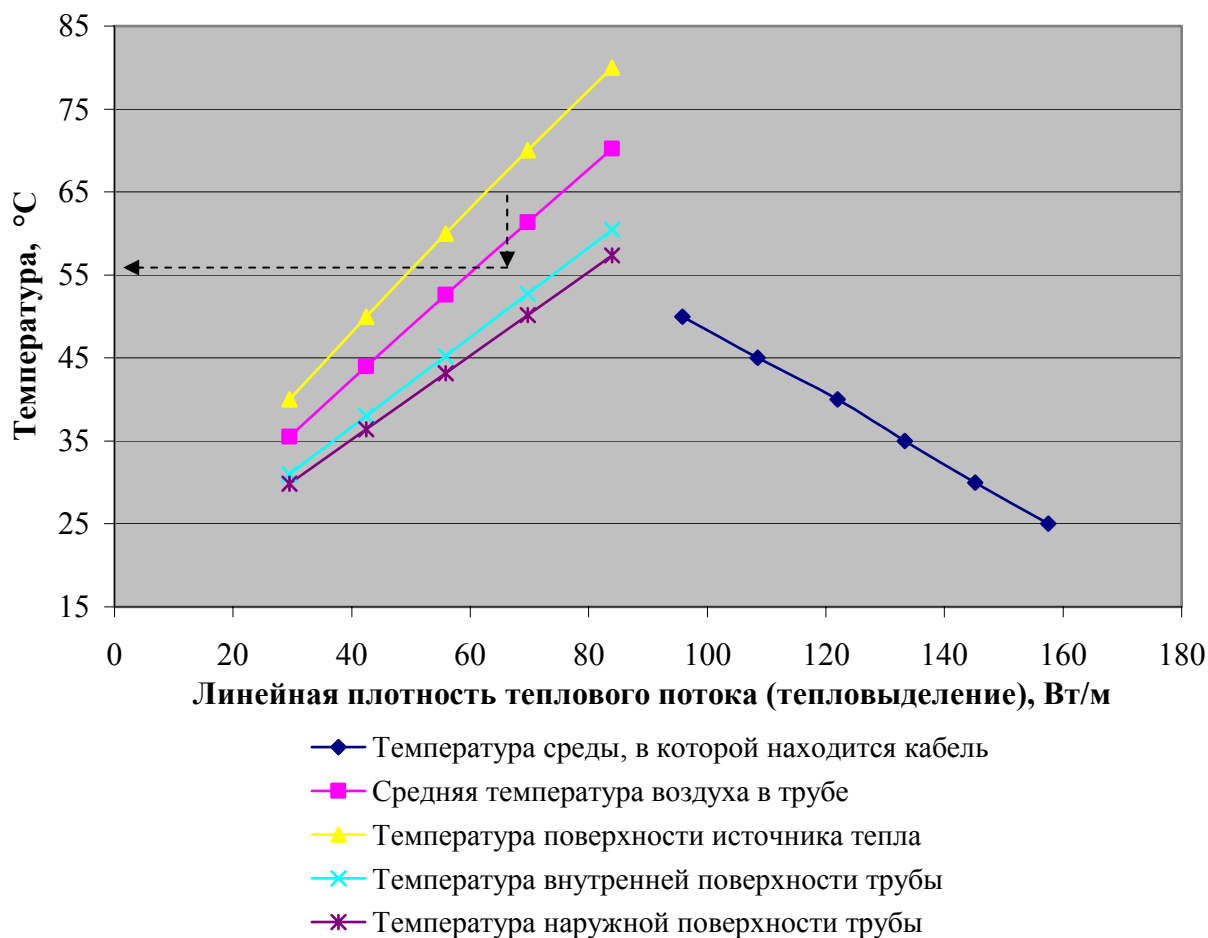
**Таблица 3.27 Тепловыделение кабеля**

|                                  |        |        |        |        |        |       |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 157,50 | 145,16 | 133,31 | 121,97 | 108,51 | 95,83 |

**Таблица 3.28 Результаты теплового расчета трубы**

|  |        |       |       |       |       |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, t1, °С                | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Линейное термическое сопротивление грунта, м·К/Вт                    | 0,504  |       |       |       |       |
| Линейное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт                     | 0,0374 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт                 | 0,305  | 0,283 | 0,264 | 0,248 | 0,233 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт                    | 0,847  | 0,825 | 0,806 | 0,789 | 0,774 |
| Температура внутренней поверхности трубы, t2, °С                     | 30,98  | 37,98 | 45,24 | 52,74 | 60,47 |
| Температура наружной поверхности трубы, t3, °С                       | 29,88  | 36,40 | 43,16 | 50,14 | 57,33 |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м                            | 29,50  | 42,43 | 55,83 | 69,68 | 83,94 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки                            | 1,597  | 1,661 | 1,694 | 1,708 | 1,709 |
| Эффективный коэффициент теплопроводности воздушной прослойки, Вт/м·К | 0,133  | 0,144 | 0,154 | 0,164 | 0,175 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки, м                           | 0,0204 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, t <sub>воз</sub> , °С           | 35,49  | 43,99 | 52,62 | 61,37 | 70,23 |

**Графики температурного режима**



Графики температуры среды, где находится кабель, и средней температуры воздуха в прослойке не пересекаются. Расчетная температура стенки трубы .... 52,2°C

## 1.15 Труба гладкая SDR21 (D=200мм); кабель 3\*АПвПу 1x185/35 – 110 кВ

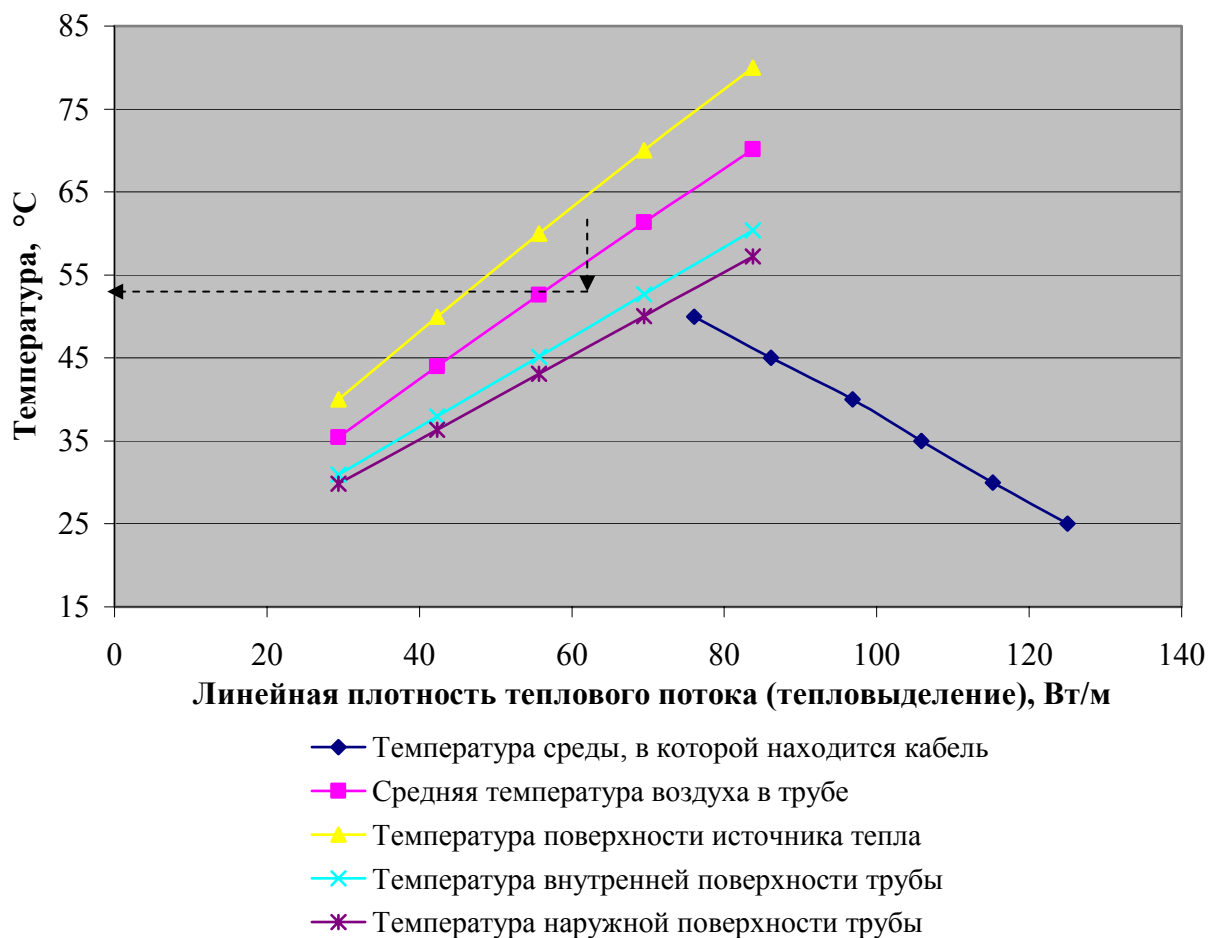
**Таблица 3.29 Тепловыделение кабеля**

|                                  |        |        |        |       |       |       |
|----------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25     | 30     | 35     | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 125,04 | 115,24 | 105,84 | 96,83 | 86,14 | 76,08 |

**Таблица 3.30 Результаты теплового расчета трубы**

|   |        |       |       |       |       |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, $t_1, ^\circ\text{C}$  | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Линейное термическое сопротивление грунта, м·К/Вт                     | 0,5043 |       |       |       |       |
| Линейное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт                      | 0,0374 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт                  | 0,308  | 0,285 | 0,266 | 0,250 | 0,234 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт                     | 0,850  | 0,827 | 0,808 | 0,791 | 0,776 |
| Температура внутренней поверхности трубы, $t_2, ^\circ\text{C}$       | 30,94  | 37,92 | 45,17 | 52,65 | 60,36 |
| Температура наружной поверхности трубы, $t_3, ^\circ\text{C}$         | 29,84  | 36,34 | 43,08 | 50,05 | 57,23 |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м                             | 29,42  | 42,32 | 55,69 | 69,51 | 83,75 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки                             | 1,628  | 1,694 | 1,728 | 1,742 | 1,743 |
| Эффективный коэффициент теплопроводности воздушной прослойки, Вт/м·К  | 0,136  | 0,147 | 0,157 | 0,168 | 0,178 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки, м                            | 0,0209 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, $t_{\text{воз}}, ^\circ\text{C}$ | 35,47  | 43,96 | 52,58 | 61,32 | 70,18 |

### Графики температурного режима



Графики температуры среды, где находится кабель, и средней температуры воздуха в прослойке не пересекаются. Расчетная температура стенки трубы .... 48°С

## 1.16 Труба гладкая SDR21 (D=250мм); кабель 3\*АПвПу 1х1000/35-110 кВ

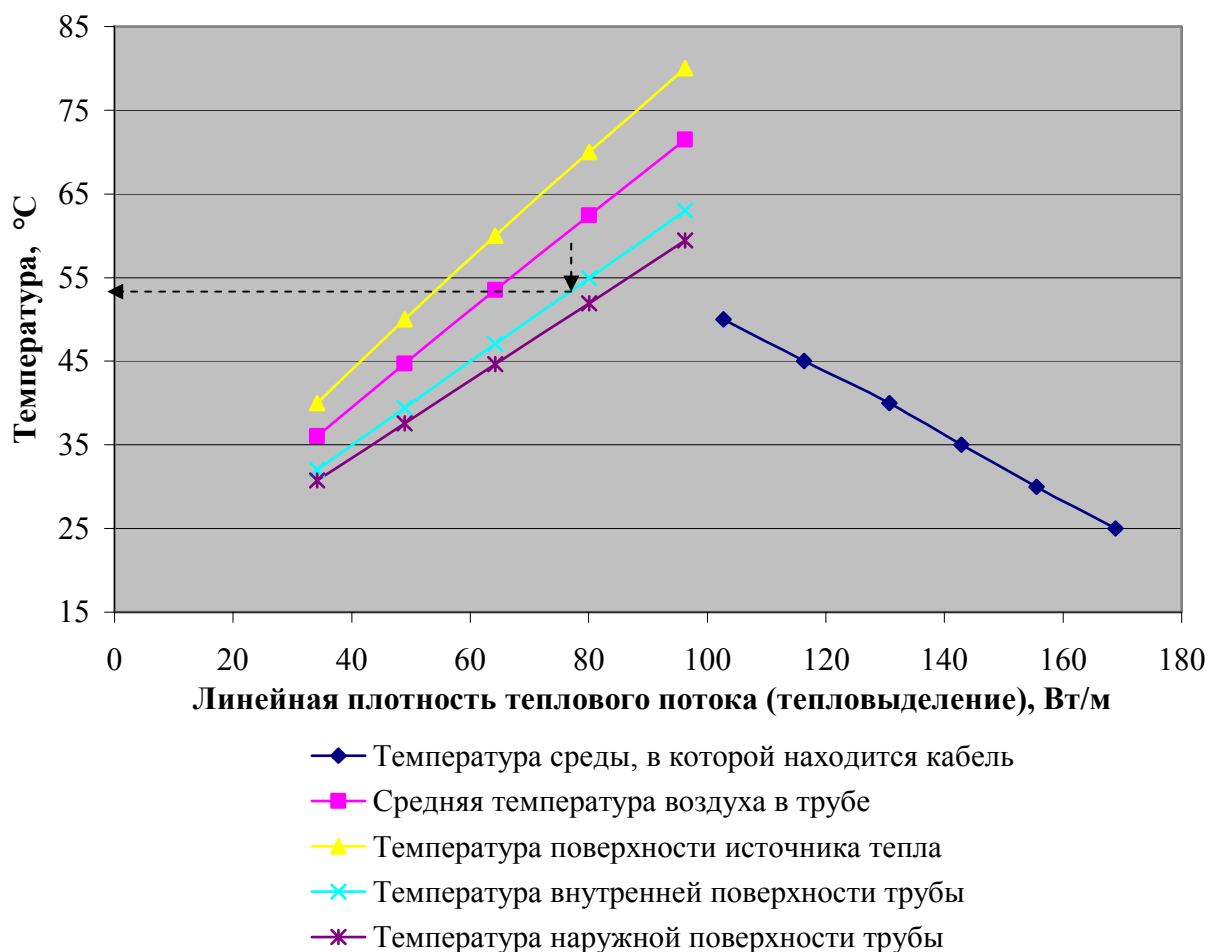
**Таблица 3.31 Тепловыделение кабеля**

|                                  |        |        |        |        |        |        |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Температура окружающей среды, °С | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 168,81 | 155,57 | 142,88 | 130,73 | 116,29 | 102,70 |

**Таблица 3.32 Результаты теплового расчета трубы**

|   |        |       |       |       |       |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, $t_1, ^\circ\text{C}$  | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Линейное термическое сопротивление грунта, м·К/Вт                     | 0,4617 |       |       |       |       |
| Линейное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт                      | 0,037  |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт                  | 0,234  | 0,216 | 0,201 | 0,189 | 0,177 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт                     | 0,732  | 0,715 | 0,700 | 0,687 | 0,676 |
| Температура внутренней поверхности трубы, $t_2, ^\circ\text{C}$       | 32,02  | 39,41 | 47,05 | 54,91 | 62,98 |
| Температура наружной поверхности трубы, $t_3, ^\circ\text{C}$         | 30,76  | 37,60 | 44,67 | 51,94 | 59,41 |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м                             | 34,14  | 48,95 | 64,26 | 80,02 | 96,21 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки                             | 1,528  | 1,587 | 1,617 | 1,627 | 1,628 |
| Эффективный коэффициент теплопроводности воздушной прослойки, Вт/м·К  | 0,133  | 0,144 | 0,155 | 0,165 | 0,176 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки, м                            | 0,0201 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, $t_{\text{воз}}, ^\circ\text{C}$ | 36,01  | 44,71 | 53,52 | 62,45 | 71,49 |

**Графики температурного режима**



Графики температуры среды, где находится кабель, и средней температуры воздуха в прослойке не пересекаются. Расчетная температура стенки трубы .... 52°С

## 2.1 Труба гофрированная SN8 (D=110мм); кабель ААШвУ 3х50 10кВ

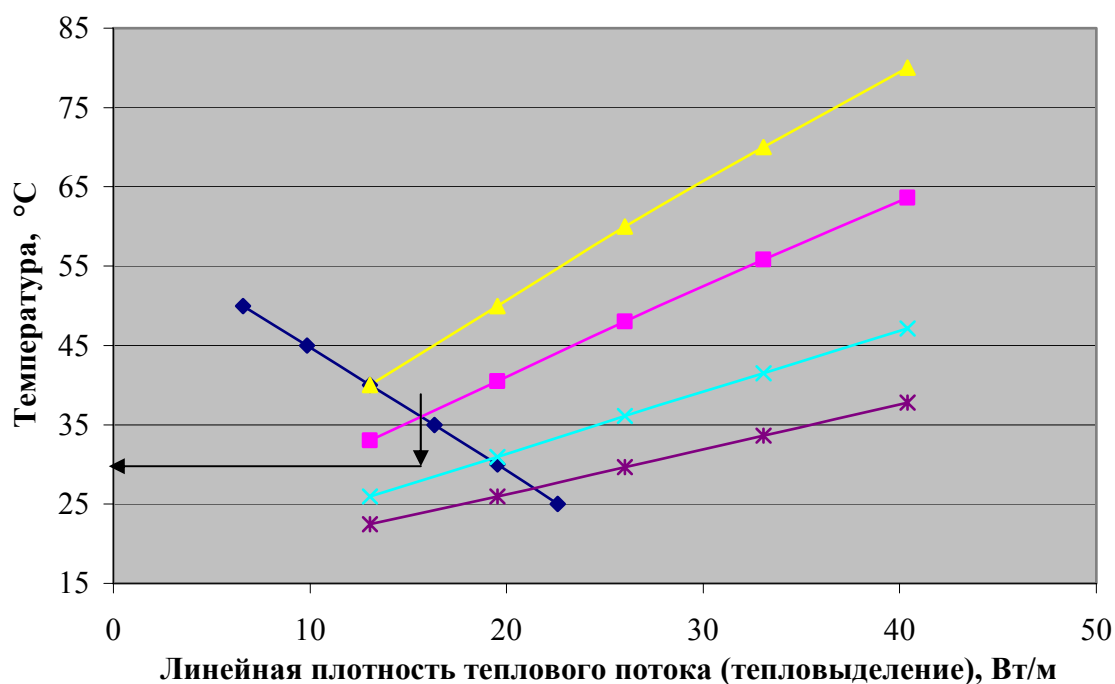
### 4.1 Тепловыделение кабеля

|                                  |       |       |       |       |      |      |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45   | 50   |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 22,59 | 19,54 | 16,32 | 13,05 | 9,84 | 6,59 |

### 4.2 Результаты теплового расчета трубы

|  |        |       |       |       |       |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С    | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Условное термическое сопротивл. гофры-грунта, м·К/Вт | 0,785  | 0,781 | 0,777 | 0,773 | 0,769 |
| Термическое сопротивление стенки трубы, м·К/Вт       | 0,0065 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт | 1,017  | 0,946 | 0,888 | 0,839 | 0,795 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт    | 1,808  | 1,734 | 1,672 | 1,618 | 1,570 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С         | 25,9   | 30,9  | 36,1  | 41,5  | 47,1  |
| Температура наружной поверхности гофры, °С           | 22,5   | 26,0  | 29,7  | 33,6  | 37,8  |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м            | 13,04  | 19,52 | 26,02 | 33,08 | 40,40 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки в трубе    | 2,22   | 2,33  | 2,40  | 2,44  | 2,46  |
| Эффективный коэфф. теплопроводности гофры, Вт/м·К    | 0,068  | 0,071 | 0,073 | 0,076 | 0,078 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки трубы, м     | 0,027  |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, °С              | 33,0   | 40,5  | 48,0  | 55,8  | 63,6  |

### Графики температурного режима



- ◆ Температура среды, в которой находится кабель
- Средняя температура воздуха в трубе
- ▲ Температура поверхности источника тепла
- × Температура внутренней поверхности трубы
- \* Температура наружной поверхности трубы

Расчетная температура стенки трубы .... 28 °С

## 2.2 Труба гофрированная SN8 (D=125мм); кабель ААШвУ 3х240 10кВ

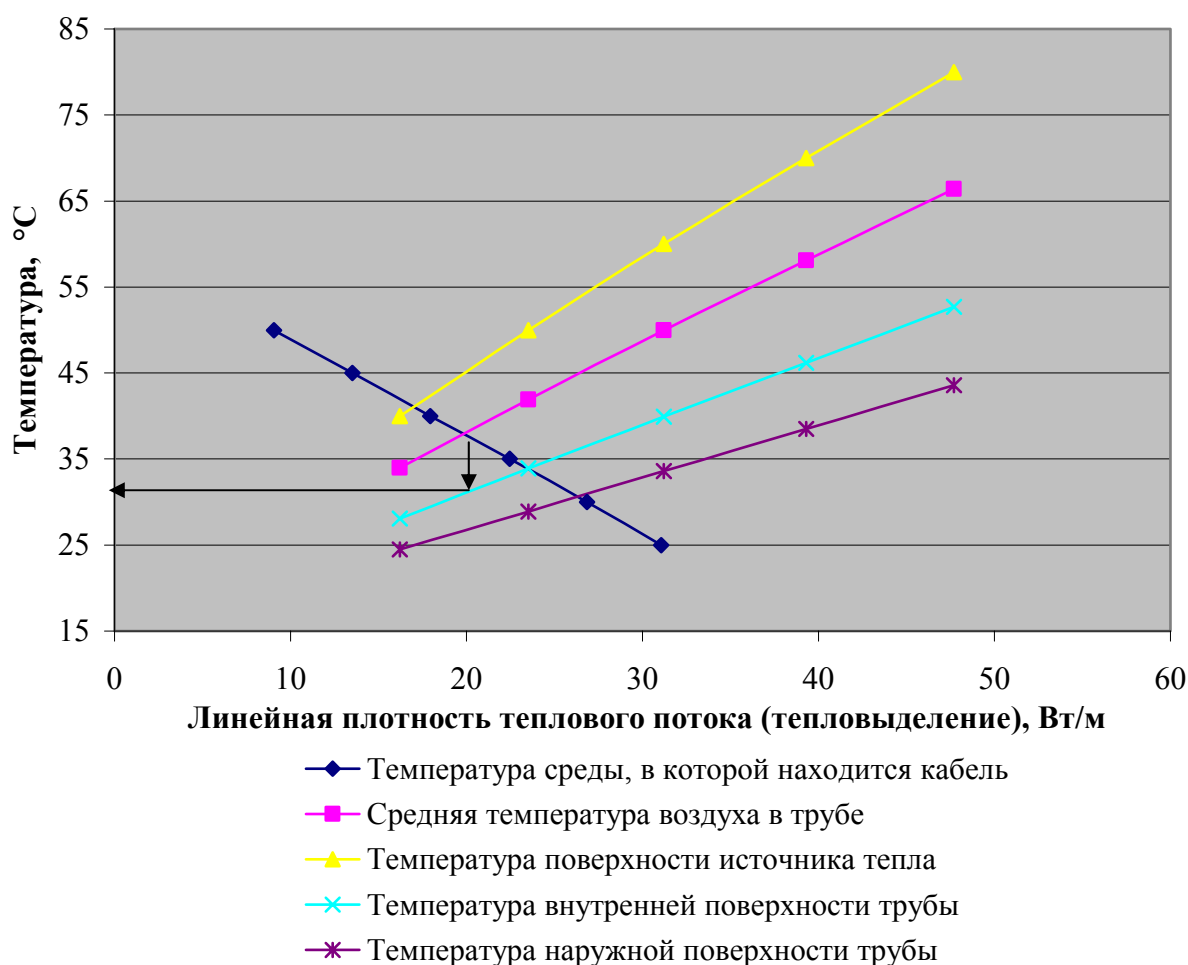
### 4.3 Тепловыделение кабеля

|                                  |       |       |       |       |       |      |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50   |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 31,06 | 26,86 | 22,44 | 17,94 | 13,53 | 9,06 |

### 4.4 Результаты теплового расчета трубы

|  |        |       |       |       |       |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С    | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Условное термическое сопротивл. гофры-грунта, м·К/Вт | 0,802  | 0,798 | 0,794 | 0,790 | 0,785 |
| Термическое сопротивление стенки трубы, м·К/Вт       | 0,0055 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт | 0,739  | 0,686 | 0,643 | 0,605 | 0,571 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт    | 1,546  | 1,490 | 1,442 | 1,400 | 1,362 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С         | 28,1   | 33,9  | 39,9  | 46,2  | 52,7  |
| Температура наружной поверхности гофры, °С           | 24,5   | 28,9  | 33,6  | 38,5  | 43,6  |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м            | 16,2   | 23,5  | 31,2  | 39,3  | 47,7  |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки в трубе    | 2,10   | 2,19  | 2,25  | 2,28  | 2,29  |
| Эффективный коэфф. теплопроводности гофры, Вт/м·К    | 0,072  | 0,075 | 0,078 | 0,081 | 0,084 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки трубы, м     | 0,0265 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, °С              | 34,0   | 41,9  | 50,0  | 58,1  | 66,4  |

### Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы .... 31 °С



## 2.3 Труба гофрированная SN8 (D=160мм); кабель АПвПу 1x185/35 110кВ

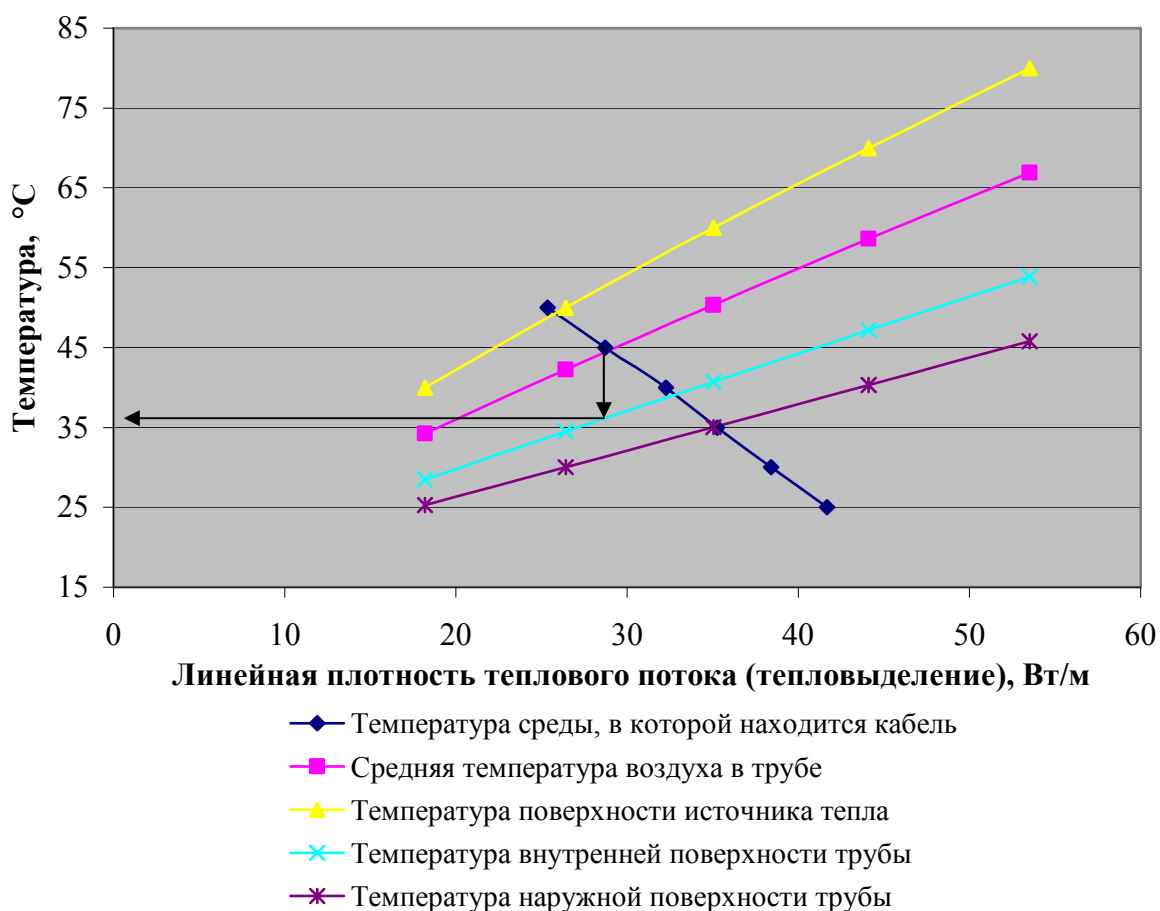
### 4.5 Тепловыделение кабеля

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 41,68 | 38,41 | 35,28 | 32,28 | 28,71 | 25,36 |

### 4.6 Результаты теплового расчета трубы

|  |        |       |       |       |       |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С    | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Условное термическое сопротивл. гофры-грунта, м·К/Вт | 0,737  | 0,733 | 0,729 | 0,725 | 0,722 |
| Термическое сопротивление стенки трубы, м·К/Вт       | 0,0042 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт | 0,633  | 0,588 | 0,550 | 0,518 | 0,488 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт    | 1,374  | 1,325 | 1,284 | 1,247 | 1,214 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С         | 28,49  | 34,48 | 40,71 | 47,18 | 53,86 |
| Температура наружной поверхности гофры, °С           | 25,30  | 30,02 | 35,02 | 40,30 | 45,78 |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м            | 18,20  | 26,41 | 35,05 | 44,10 | 53,53 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки в трубе    | 2,69   | 2,81  | 2,88  | 2,92  | 2,93  |
| Эффективный коэфф. теплопроводности гофры, Вт/м·К    | 0,078  | 0,081 | 0,085 | 0,088 | 0,092 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки трубы, м     | 0,0375 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, °С              | 34,25  | 42,24 | 50,35 | 58,59 | 66,93 |

### Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы .... 37 °С

## 2.4 Труба гофрированная SN8 (D=110мм); кабель АПвПу 3х50/16 10кВ

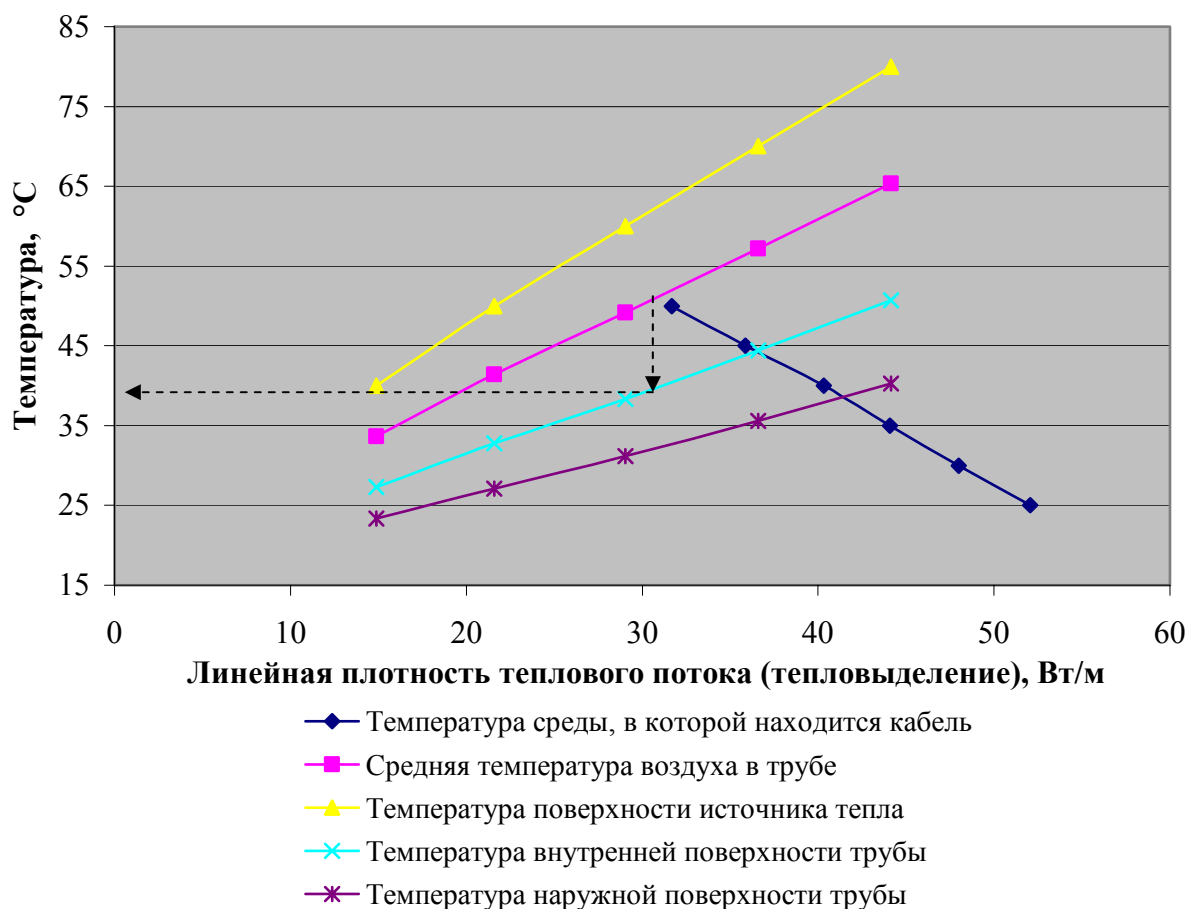
### 4.7 Тепловыделение кабеля

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 52,06 | 47,98 | 44,07 | 40,32 | 35,87 | 31,68 |

### 4.8 Результаты теплового расчета трубы

|  |        |       |       |       |       |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С    | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Условное термическое сопротивл. гофры-грунта, м·К/Вт | 0,784  | 0,780 | 0,776 | 0,771 | 0,767 |
| Термическое сопротивление стенки трубы, м·К/Вт       | 0,0065 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт | 0,849  | 0,789 | 0,740 | 0,698 | 0,660 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт    | 1,640  | 1,576 | 1,522 | 1,475 | 1,433 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С         | 27,28  | 32,78 | 38,31 | 44,40 | 50,68 |
| Температура наружной поверхности гофры, °С           | 23,38  | 27,12 | 31,20 | 35,60 | 40,25 |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м            | 14,90  | 21,60 | 29,05 | 36,60 | 44,15 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки в трубе    | 1,89   | 1,98  | 2,04  | 2,07  | 2,08  |
| Эффективный коэфф. теплопроводности гофры, Вт/м·К    | 0,069  | 0,071 | 0,074 | 0,077 | 0,080 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки трубы, м     | 0,0225 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, °С              | 33,64  | 41,39 | 49,16 | 57,20 | 65,34 |

### Графики температурного режима



Графики температуры среды, где находится кабель, и средней температуры воздуха в прослойке не пересекаются. Расчетная температура стенки трубы .... 39 °С

## 2.5 Труба гофрированная SN8 (D=110мм); кабель АПвПу 1х50/16 35кВ

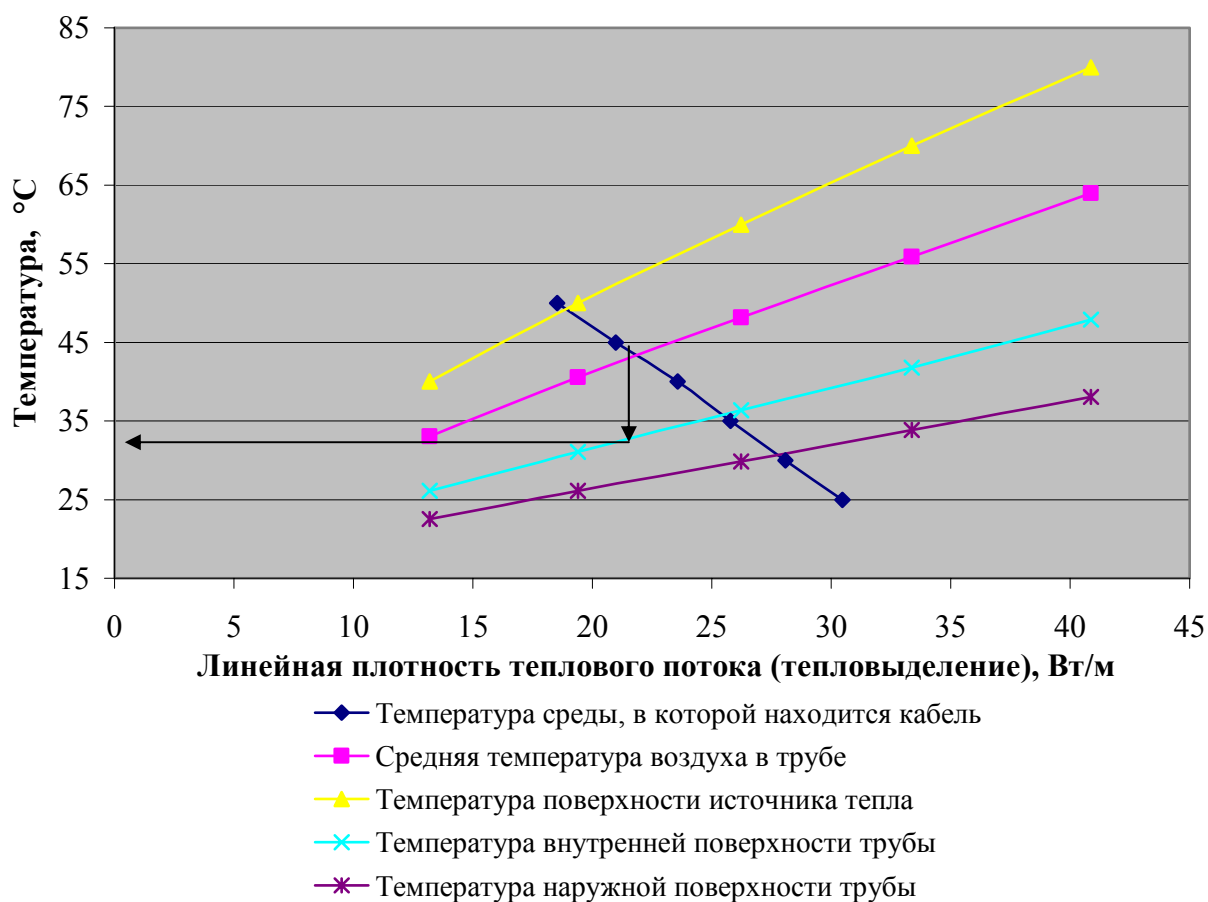
### 4.9 Тепловыделение кабеля

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 30,46 | 28,07 | 25,78 | 23,58 | 20,98 | 18,53 |

### 4.10 Результаты теплового расчета трубы

|  |        |       |       |       |       |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С    | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Условное термическое сопротивл. гофры-грунта, м·К/Вт | 0,785  | 0,781 | 0,777 | 0,773 | 0,769 |
| Термическое сопротивление стенки трубы, м·К/Вт       | 0,0065 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт | 0,995  | 0,926 | 0,869 | 0,821 | 0,777 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт    | 1,786  | 1,713 | 1,653 | 1,600 | 1,552 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С         | 26,10  | 31,10 | 36,34 | 41,80 | 47,87 |
| Температура наружной поверхности гофры, °С           | 22,55  | 26,10 | 29,87 | 33,86 | 38,07 |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м            | 13,19  | 19,40 | 26,22 | 33,38 | 40,87 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки в трубе    | 2,19   | 2,29  | 2,36  | 2,40  | 2,41  |
| Эффективный коэфф. теплопроводности гофры, Вт/м·К    | 0,068  | 0,071 | 0,073 | 0,076 | 0,078 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки трубы, м     | 0,027  |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, °С              | 33,05  | 40,6  | 48,17 | 55,9  | 63,94 |

### Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы .... 33 °С

## 2.6 Труба гофрированная SN8 (D=160мм); кабель АПвПу 1х800/35 35кВ

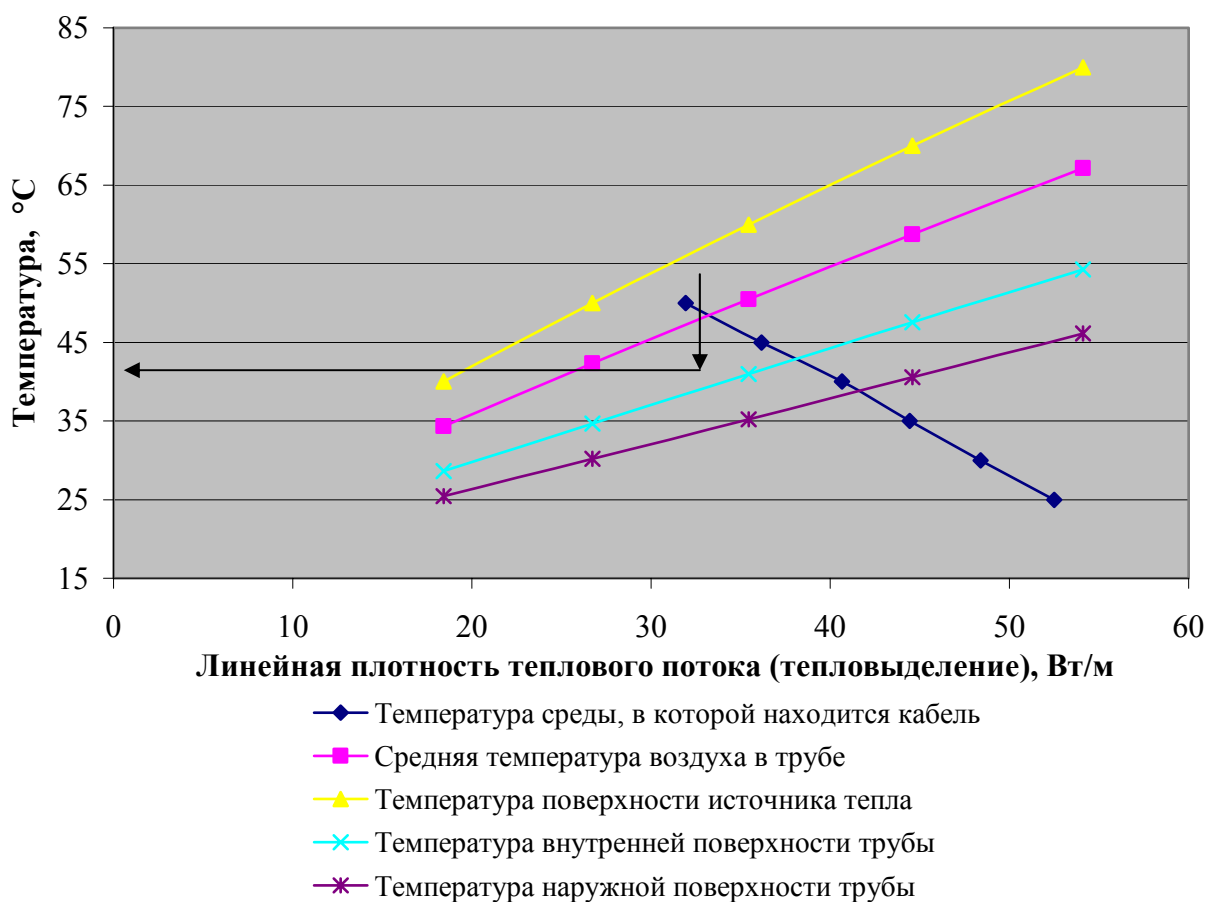
### 4.11 Тепловыделение кабеля

|                                  |      |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25   | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 52,5 | 48,39 | 44,44 | 40,66 | 36,17 | 31,94 |

### 4.12 Результаты теплового расчета трубы

|  |        |       |       |       |       |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С    | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Условное термическое сопротивл. гофры-грунта, м·К/Вт | 0,737  | 0,733 | 0,729 | 0,725 | 0,721 |
| Термическое сопротивление стенки трубы, м·К/Вт       | 0,0042 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт | 0,617  | 0,573 | 0,536 | 0,504 | 0,475 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт    | 1,358  | 1,310 | 1,269 | 1,233 | 1,201 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С         | 28,65  | 34,70 | 41,00 | 47,53 | 54,27 |
| Температура наружной поверхности гофры, °С           | 25,43  | 30,16 | 35,21 | 40,59 | 46,13 |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м            | 18,42  | 26,72 | 35,45 | 44,59 | 54,12 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки в трубе    | 2,63   | 2,75  | 2,81  | 2,85  | 2,86  |
| Эффективный коэфф. теплопроводности гофры, Вт/м·К    | 0,078  | 0,081 | 0,085 | 0,088 | 0,093 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки трубы, м     | 0,0365 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, °С              | 34,32  | 42,35 | 50,50 | 58,77 | 67,13 |

### Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы .... 39 °С

## 2.7 Труба гофрированная SN8 (D=160мм); кабель АНХАМК-W 3x70/35 - 20

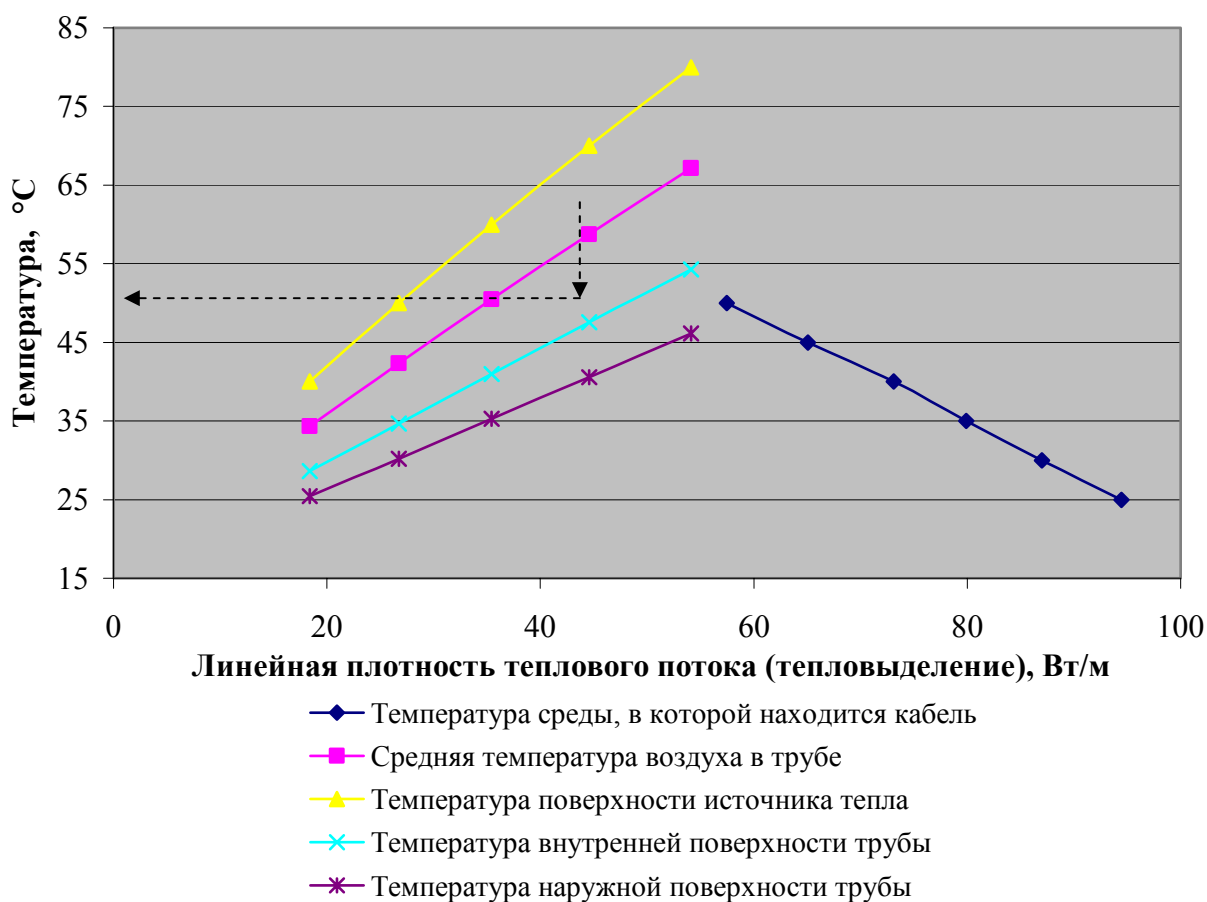
### 4.13 Тепловыделение кабеля

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 94.43 | 87.03 | 79.93 | 73.13 | 65.06 | 57.45 |

### 4.14 Результаты теплового расчета трубы

|  |        |       |       |       |       |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С    | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Условное термическое сопротивл. гофры-грунта, м·К/Вт | 0,737  | 0,733 | 0,729 | 0,725 | 0,721 |
| Термическое сопротивление стенки трубы, м·К/Вт       | 0,0042 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт | 0,617  | 0,573 | 0,536 | 0,504 | 0,475 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт    | 1,358  | 1,310 | 1,269 | 1,233 | 1,201 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С         | 28,65  | 34,70 | 41,00 | 47,59 | 54,27 |
| Температура наружной поверхности гофры, °С           | 25,43  | 30,16 | 35,25 | 40,59 | 46,13 |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м            | 18,41  | 26,72 | 35,45 | 44,59 | 54,12 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки в трубе    | 2,63   | 2,75  | 2,81  | 2,85  | 2,86  |
| Эффективный коэфф. теплопроводности гофры, Вт/м·К    | 0,078  | 0,081 | 0,085 | 0,088 | 0,093 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки трубы, м     | 0,0365 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, °С              | 34,32  | 42,35 | 50,50 | 58,77 | 67,13 |

### Графики температурного режима



Графики температуры среды, где находится кабель, и средней температуры воздуха в прослойке не пересекаются. Расчетная температура стенки трубы .... 48 °С

## 2.8 Труба гофрированная SN8 (D=160мм); кабель АПвПу 3х240/25 – 10кВ

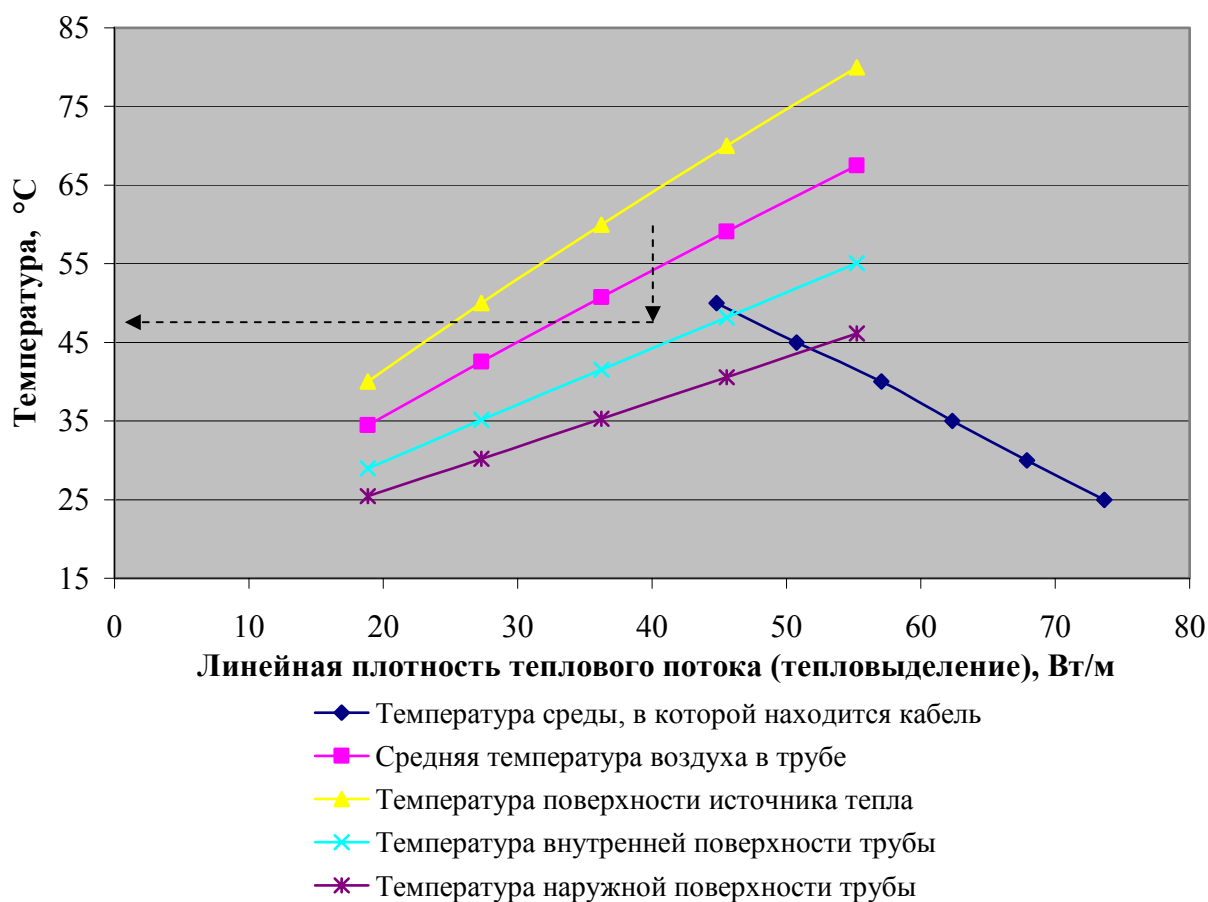
### 4.15 Тепловыделение кабеля

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 73,67 | 67,90 | 62,36 | 57,05 | 50,75 | 44,82 |

### 4.16 Результаты теплового расчета трубы

|  |        |       |       |       |       |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С    | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Условное термическое сопротивл. гофры-грунта, м·К/Вт | 0,736  | 0,733 | 0,729 | 0,725 | 0,721 |
| Термическое сопротивление стенки трубы, м·К/Вт       | 0,0042 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт | 0,587  | 0,545 | 0,509 | 0,479 | 0,451 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт    | 1,327  | 1,281 | 1,242 | 1,208 | 1,177 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С         | 28,96  | 35,13 | 41,55 | 48,20 | 55,06 |
| Температура наружной поверхности гофры, °С           | 25,43  | 30,16 | 35,25 | 40,59 | 46,13 |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м            | 18,84  | 27,32 | 36,22 | 45,54 | 55,25 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки в трубе    | 2,50   | 2,61  | 2,67  | 2,71  | 2,72  |
| Эффективный коэфф. теплопроводности гофры, Вт/м·К    | 0,078  | 0,081 | 0,085 | 0,089 | 0,093 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки трубы, м     | 0,0345 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, °С              | 34,48  | 42,57 | 50,78 | 59,1  | 67,53 |

### Графики температурного режима



Графики температуры среды, где находится кабель, и средней температуры воздуха в прослойке не пересекаются. Расчетная температура стенки трубы .... 44 °С

## 2.9 Труба гофрированная SN8 (D=200мм); кабель АПвПу 1х1000/35 – 110кВ

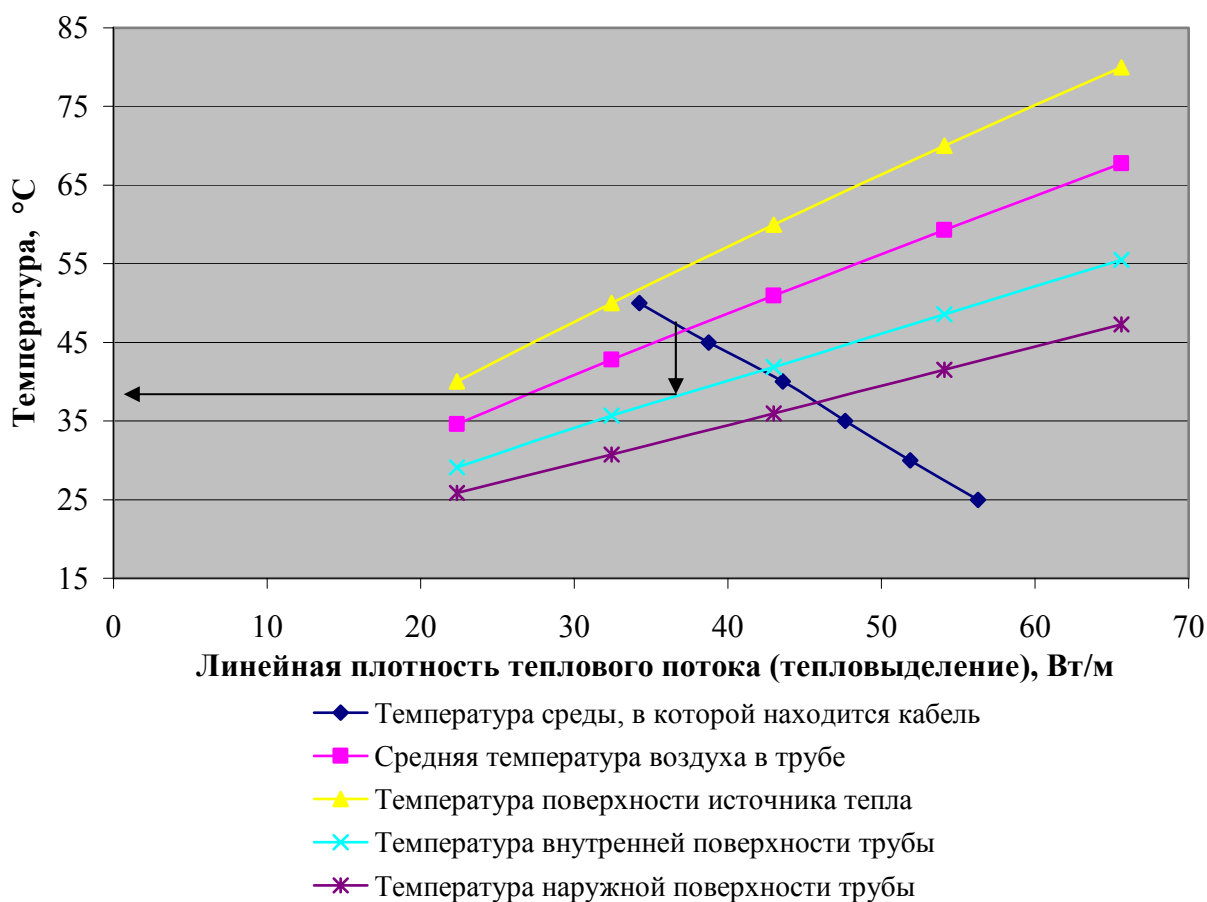
### 4.17 Тепловыделение кабеля

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 56,27 | 51,86 | 47,63 | 43,58 | 38,76 | 34,23 |

### 4.18 Результаты теплового расчета трубы

|  |        |       |       |       |       |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С    | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Условное термическое сопротивл. гофры-грунта, м·К/Вт | 0,627  | 0,623 | 0,620 | 0,616 | 0,612 |
| Термическое сопротивление стенки трубы, м·К/Вт       | 0,0046 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт | 0,486  | 0,451 | 0,422 | 0,397 | 0,374 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт    | 1,118  | 1,079 | 1,047 | 1,017 | 0,99  |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С         | 29,13  | 35,67 | 41,85 | 48,56 | 55,49 |
| Температура наружной поверхности гофры, °С           | 25,82  | 30,72 | 35,94 | 41,51 | 47,28 |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м            | 22,37  | 32,43 | 43,00 | 54,08 | 65,63 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки в трубе    | 3,04   | 3,17  | 3,25  | 3,29  | 3,30  |
| Эффективный коэфф. теплопроводности гофры, Вт/м·К    | 0,093  | 0,097 | 0,101 | 0,107 | 0,113 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки трубы, м     | 0,045  |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, °С              | 34,57  | 42,84 | 50,93 | 59,28 | 67,75 |

### Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы .... 38 °С

## 2.10 Труба гофрированная SN8 (D=200мм); кабель АНХАМК-W 3x240/70 –20кВ

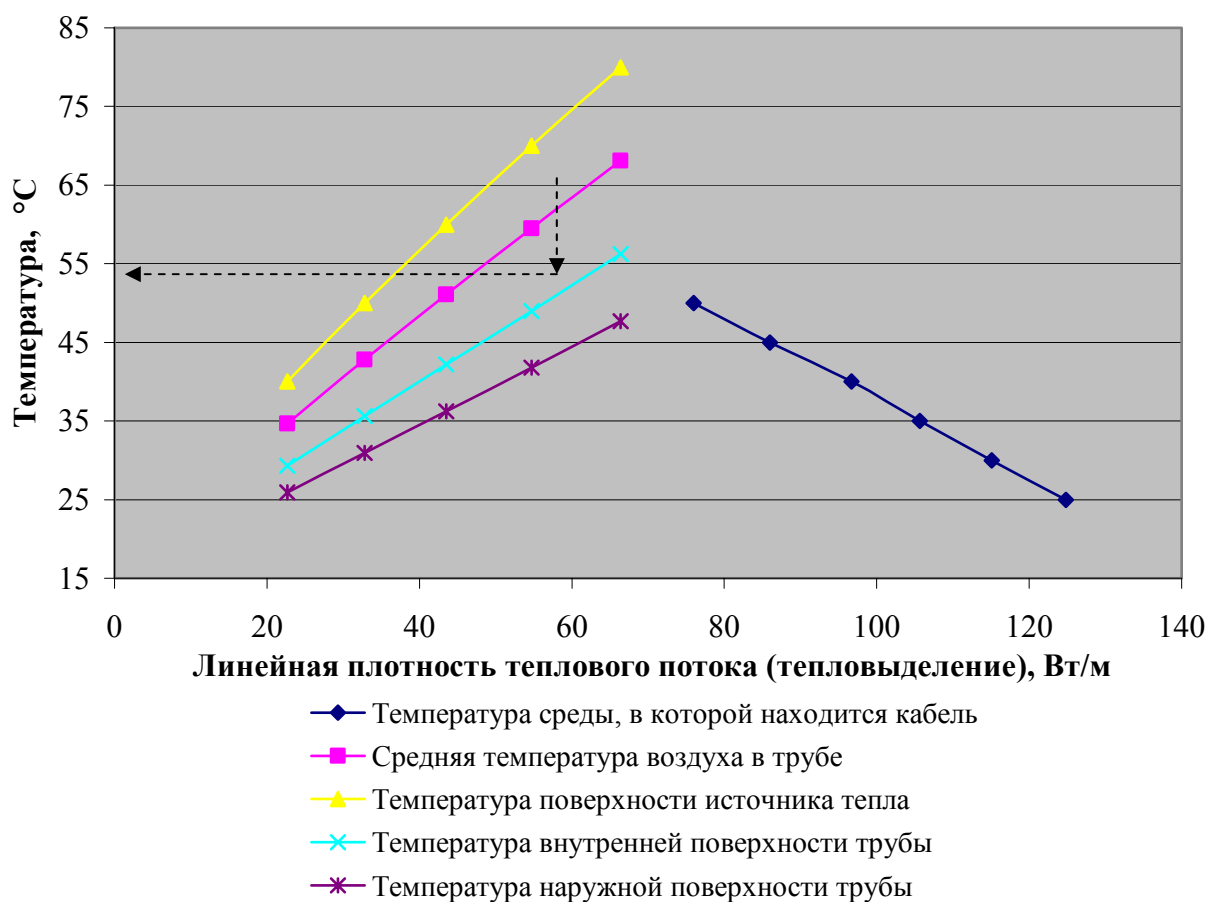
### 4.19 Тепловыделение кабеля

|                                  |        |        |        |       |       |       |
|----------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25     | 30     | 35     | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 124,85 | 115,06 | 105,67 | 96,68 | 86,01 | 75,96 |

### 4.20 Результаты теплового расчета трубы

|  |        |       |       |       |       |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С    | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Условное термическое сопротивл. гофры-грунта, м·К/Вт | 0,627  | 0,623 | 0,620 | 0,616 | 0,612 |
| Термическое сопротивление стенки трубы, м·К/Вт       | 0,0046 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт | 0,472  | 0,438 | 0,410 | 0,385 | 0,362 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт    | 1,103  | 1,066 | 1,034 | 1,005 | 0,980 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С         | 29,30  | 35,62 | 42,18 | 48,95 | 56,23 |
| Температура наружной поверхности гофры, °С           | 25,91  | 30,96 | 36,25 | 41,80 | 47,66 |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м            | 22,66  | 32,84 | 43,53 | 54,73 | 66,40 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки в трубе    | 2,95   | 3,079 | 3,15  | 3,19  | 3,19  |
| Эффективный коэфф. теплопроводности гофры, Вт/м·К    | 0,093  | 0,097 | 0,101 | 0,107 | 0,113 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки трубы, м     | 0,0435 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, °С              | 34,65  | 42,81 | 51,09 | 59,48 | 68,12 |

### Графики температурного режима



Графики температуры среды, где находится кабель, и средней температуры воздуха в прослойке не пересекаются. Расчетная температура стенки трубы .... 49 °С



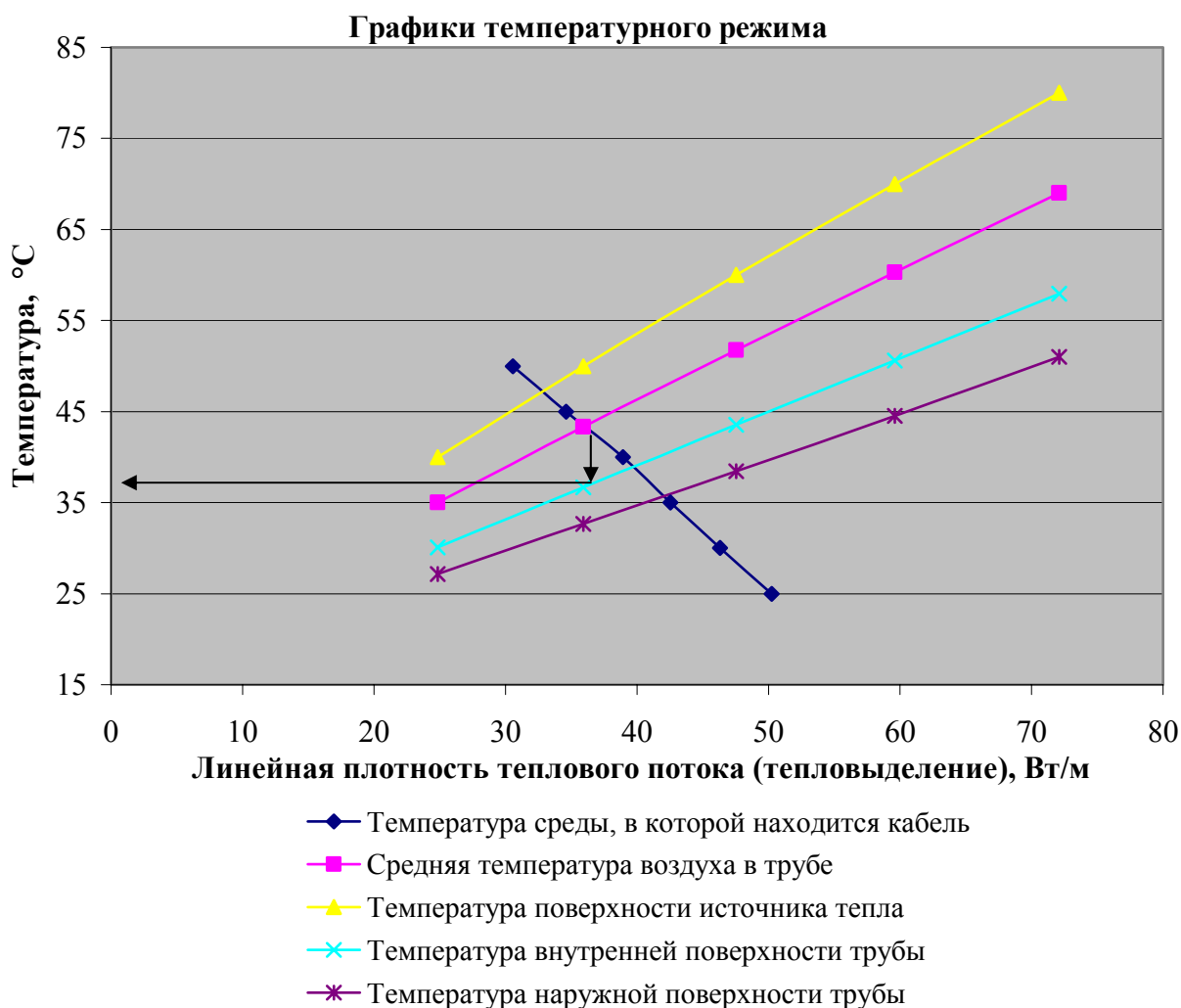
## 2.11 Труба гофрированная SN8 (D=250мм); кабель АПвПу 1х630/150 – 220кВ

### 4.21 Тепловыделение кабеля

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 50,25 | 46,31 | 42,53 | 38,92 | 34,62 | 30,57 |

### 4.22 Результаты теплового расчета трубы

|  |        |       |       |       |       |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С    | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Условное термическое сопротивл. гофры-грунта, м·К/Вт | 0,601  | 0,598 | 0,596 | 0,593 | 0,591 |
| Термическое сопротивление стенки трубы, м·К/Вт       | 0,0048 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт | 0,400  | 0,371 | 0,347 | 0,325 | 0,306 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт    | 1,006  | 0,974 | 0,947 | 0,923 | 0,901 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С         | 30,07  | 36,67 | 43,53 | 50,63 | 57,96 |
| Температура наружной поверхности гофры, °С           | 27,14  | 32,63 | 38,43 | 44,53 | 50,99 |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м            | 24,85  | 35,92 | 47,52 | 59,59 | 72,11 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки в трубе    | 3,42   | 3,57  | 3,65  | 3,69  | 3,70  |
| Эффективный коэфф. теплопроводности гофры, Вт/м·К    | 0,104  | 0,110 | 0,117 | 0,123 | 0,130 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки трубы, м     | 0,0545 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, °С              | 35,03  | 43,34 | 51,77 | 60,31 | 68,98 |



Расчетная температура стенки трубы .... 37 °С

## 2.12 Труба гофрированная SN8 (D=250мм); кабель АПвПу 1х1000/150 – 220кВ

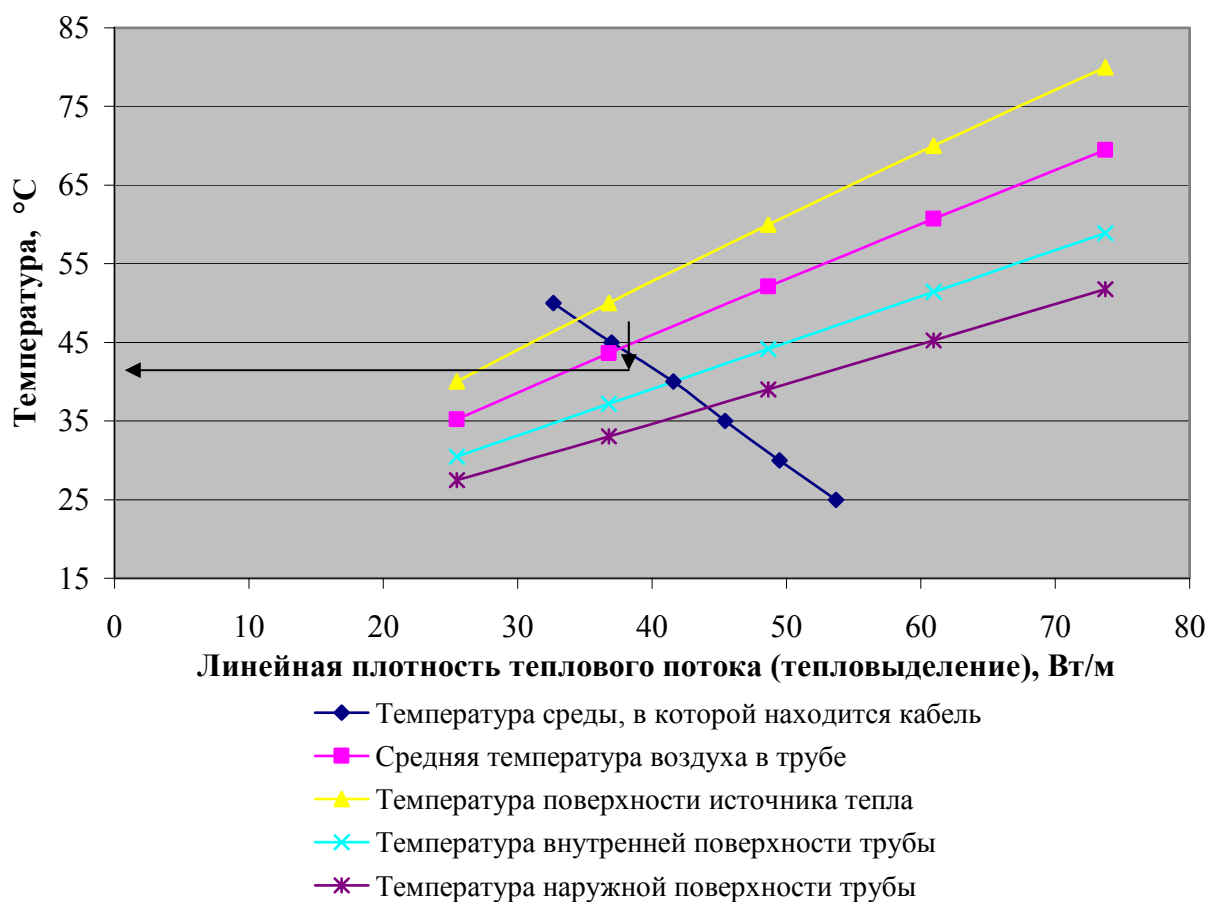
### 4.23 Тепловыделение кабеля

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 53,68 | 49,47 | 45,43 | 41,57 | 36,98 | 32,66 |

### 4.24 Результаты теплового расчета трубы

|  |        |       |       |       |       |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С    | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Условное термическое сопротивл. гофры-грунта, м·К/Вт | 0,601  | 0,598 | 0,595 | 0,593 | 0,591 |
| Термическое сопротивление стенки трубы, м·К/Вт       | 0,0048 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт | 0,376  | 0,348 | 0,325 | 0,305 | 0,286 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт    | 0,982  | 0,951 | 0,925 | 0,902 | 0,882 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С         | 30,44  | 37,19 | 44,19 | 51,43 | 58,88 |
| Температура наружной поверхности гофры, °С           | 27,45  | 33,07 | 38,99 | 45,22 | 51,74 |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м            | 25,47  | 36,80 | 48,64 | 60,95 | 73,72 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки в трубе    | 3,20   | 3,34  | 3,41  | 3,44  | 3,45  |
| Эффективный коэфф. теплопроводности гофры, Вт/м·К    | 0,104  | 0,110 | 0,117 | 0,124 | 0,131 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки трубы, м     | 0,0505 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, °С              | 35,22  | 43,60 | 52,10 | 60,74 | 69,44 |

### Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы .... 38 °С

## 2.13 Труба гофрированная SN8 (D=125мм); кабель 3\*АПвПу 1х50/16 – 35кВ

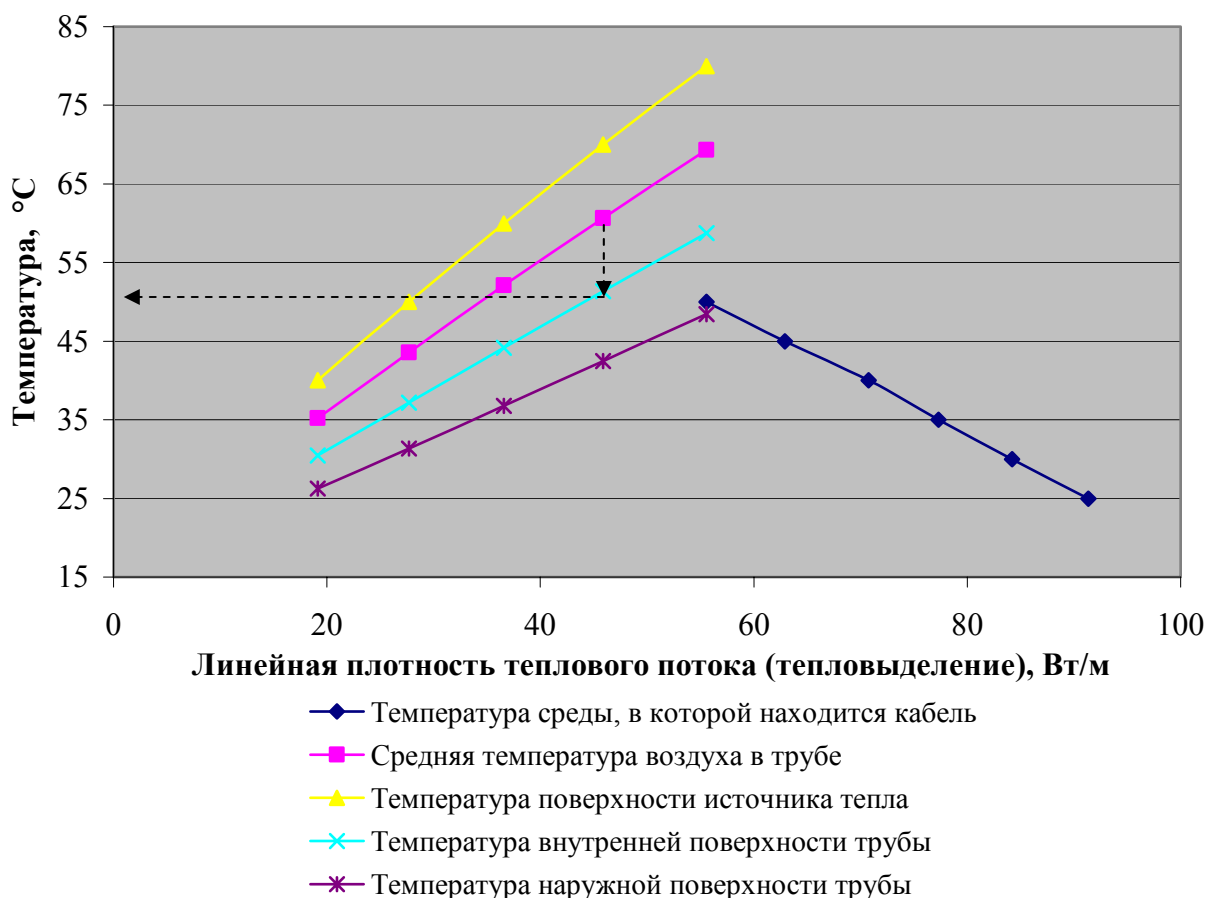
### 4.25 Тепловыделение кабеля

|                                  |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 91,37 | 84,20 | 77,33 | 70,75 | 62,94 | 55,59 |

### 4.26 Результаты теплового расчета трубы

|  |        |       |       |       |       |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С    | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Условное термическое сопротивл. гофры-грунта, м·К/Вт | 0,801  | 0,796 | 0,791 | 0,786 | 0,782 |
| Термическое сопротивление стенки трубы, м·К/Вт       | 0,0055 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт | 0,500  | 0,464 | 0,433 | 0,407 | 0,383 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт    | 1,306  | 1,265 | 1,230 | 1,198 | 1,170 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С         | 30,44  | 37,18 | 44,16 | 51,34 | 58,73 |
| Температура наружной поверхности гофры, °С           | 26,27  | 31,38 | 36,80 | 42,49 | 48,47 |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м            | 19,14  | 27,67 | 36,59 | 45,89 | 55,56 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки в трубе    | 1,12   | 1,17  | 1,20  | 1,21  | 1,21  |
| Эффективный коэфф. теплопроводности гофры, Вт/м·К    | 0,073  | 0,076 | 0,080 | 0,083 | 0,088 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки трубы, м     | 0,0125 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, °С              | 35,22  | 43,59 | 52,08 | 60,67 | 69,36 |

### Графики температурного режима



Графики температуры среды, где находится кабель, и средней температуры воздуха в прослойке не пересекаются. Расчетная температура стенки трубы .... 50°С

## 2.14 Труба гофрированная SN8 (D=200мм); кабель 3\*АПвПу 1х185/35 – 110кВ

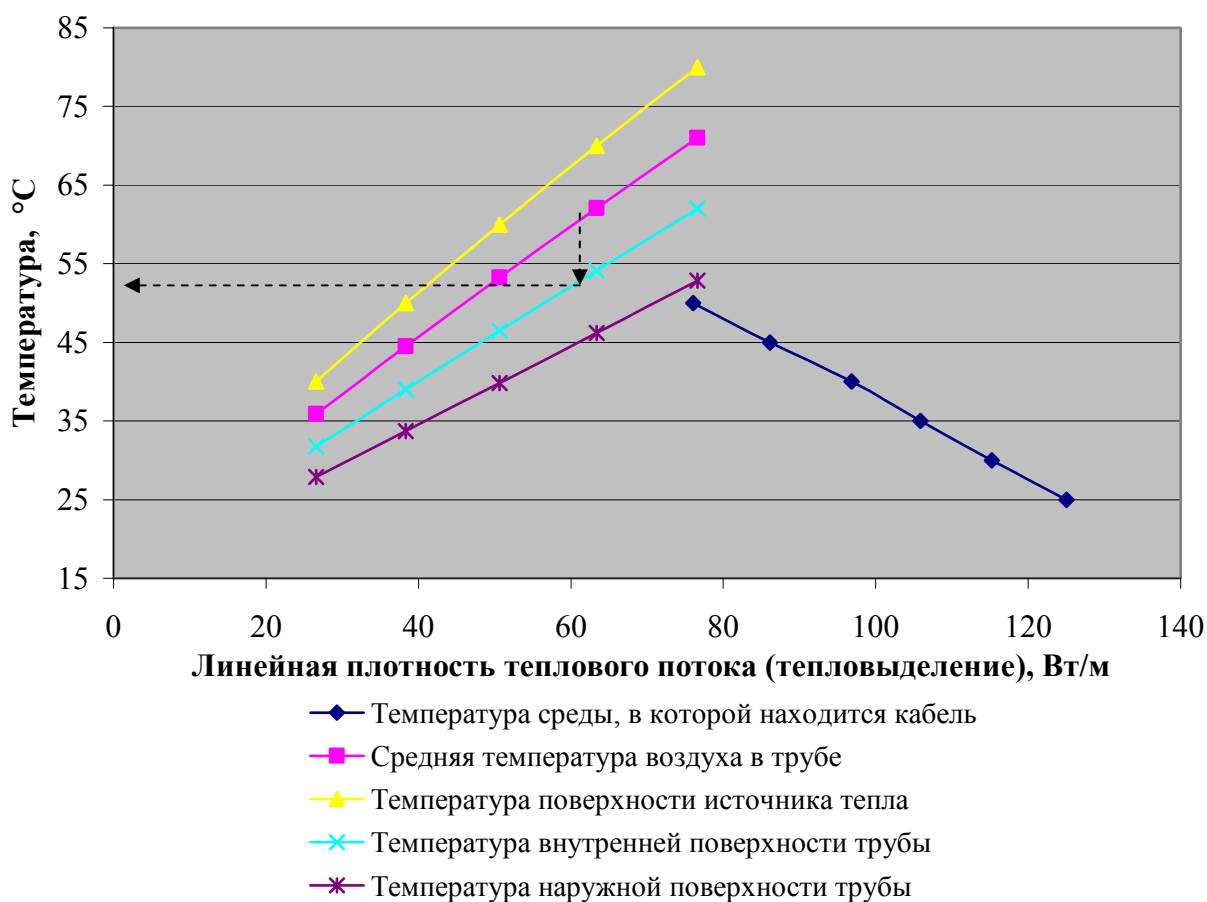
### 4.27 Тепловыделение кабеля

|                                  |        |        |        |       |       |       |
|----------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25     | 30     | 35     | 40    | 45    | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 125,04 | 115,24 | 105,84 | 96,83 | 86,14 | 76,08 |

### 4.28 Результаты теплового расчета трубы

|  |        |       |       |       |       |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С    | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Условное термическое сопротивл. гофры-грунта, м·К/Вт | 0,625  | 0,621 | 0,617 | 0,613 | 0,609 |
| Термическое сопротивление стенки трубы, м·К/Вт       | 0,0046 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт | 0,309  | 0,287 | 0,267 | 0,250 | 0,235 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт    | 0,939  | 0,912 | 0,889 | 0,868 | 0,849 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С         | 31,78  | 39,03 | 46,47 | 54,15 | 62,00 |
| Температура наружной поверхности гофры, °С           | 27,92  | 33,71 | 39,81 | 46,21 | 52,83 |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м            | 26,62  | 38,36 | 50,63 | 63,39 | 76,59 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки в трубе    | 1,45   | 1,51  | 1,54  | 1,55  | 1,55  |
| Эффективный коэфф. теплопроводности гофры, Вт/м·К    | 0,094  | 0,099 | 0,105 | 0,112 | 0,118 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки трубы, м     | 0,0185 |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, °С              | 35,89  | 44,51 | 53,24 | 62,08 | 71,00 |

### Графики температурного режима



Графики температуры среды, где находится кабель, и средней температуры воздуха в прослойке не пересекаются. Расчетная температура стенки трубы .... 52 °С

## 2.15 Труба гофрированная SN8 (D=200мм); кабель 3\*АПвПу 1х800/35 – 35кВ

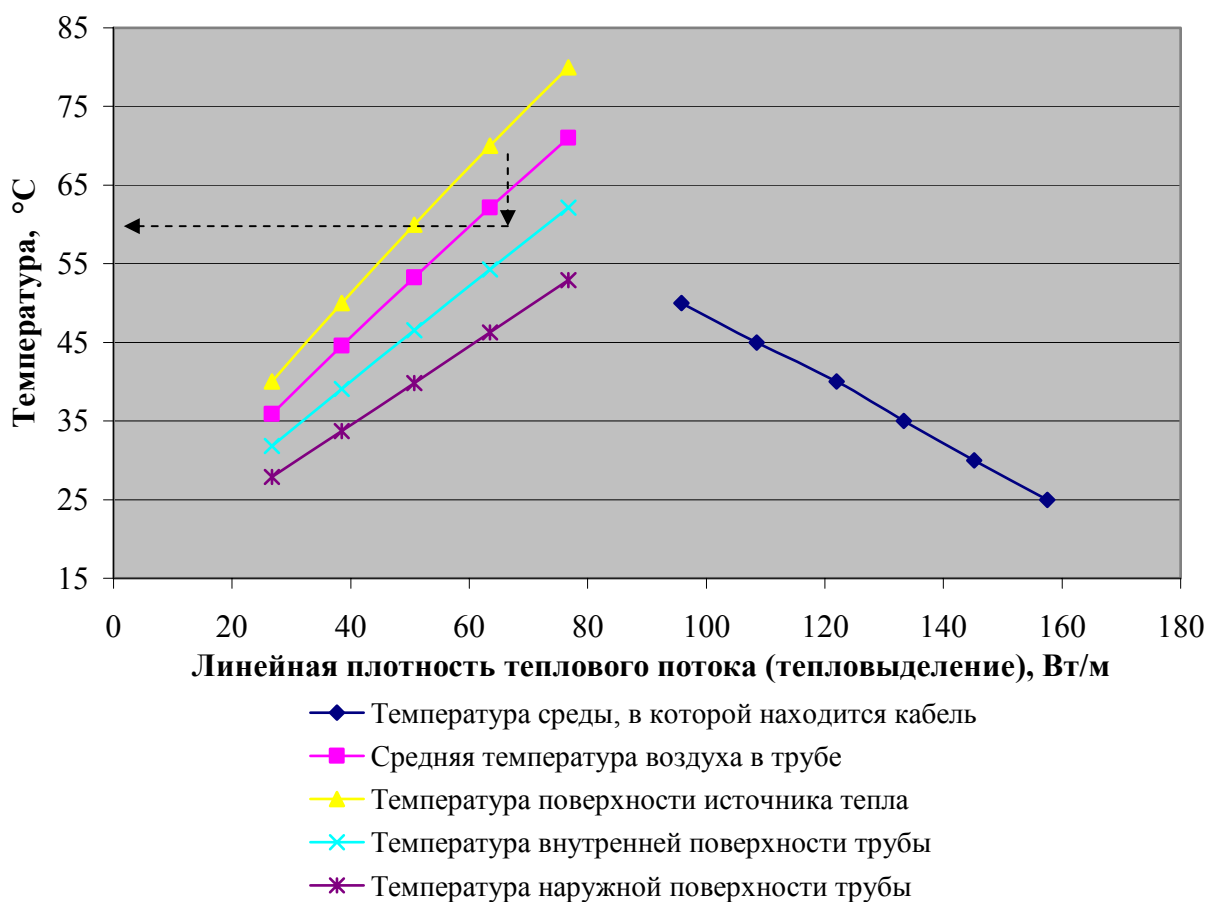
### 4.29 Тепловыделение кабеля

|                                  |       |        |        |        |        |       |
|----------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Температура окружающей среды, °С | 25    | 30     | 35     | 40     | 45     | 50    |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 157,5 | 145,16 | 133,31 | 121,97 | 108,51 | 95,83 |

### 4.30 Результаты теплового расчета трубы

|  |        |       |       |       |       |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С    | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Условное термическое сопротивл. гофры-грунта, м·К/Вт | 0,625  | 0,621 | 0,617 | 0,613 | 0,609 |
| Термическое сопротивление стенки трубы, м·К/Вт       | 0,0046 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт | 0,307  | 0,284 | 0,265 | 0,248 | 0,233 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт    | 0,937  | 0,910 | 0,887 | 0,866 | 0,847 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С         | 31,82  | 39,08 | 46,56 | 54,24 | 62,11 |
| Температура наружной поверхности гофры, °С           | 27,90  | 33,69 | 39,81 | 46,24 | 52,92 |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м            | 26,69  | 38,46 | 50,76 | 63,54 | 76,77 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки в трубе    | 1,42   | 1,47  | 1,50  | 1,52  | 1,52  |
| Эффективный коэфф. теплопроводности гофры, Вт/м·К    | 0,094  | 0,099 | 0,105 | 0,112 | 0,118 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки трубы, м     | 0,018  |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, °С              | 35,91  | 44,54 | 53,28 | 62,12 | 71,05 |

### Графики температурного режима



Графики температуры среды, где находится кабель, и средней температуры воздуха в прослойке не пересекаются. Расчетная температура стенки трубы .... 54 °С

## 2.16 Труба гофрированная SN8 (D=250мм); кабель 3\*АПвПу 1х1000/35 – 110кВ

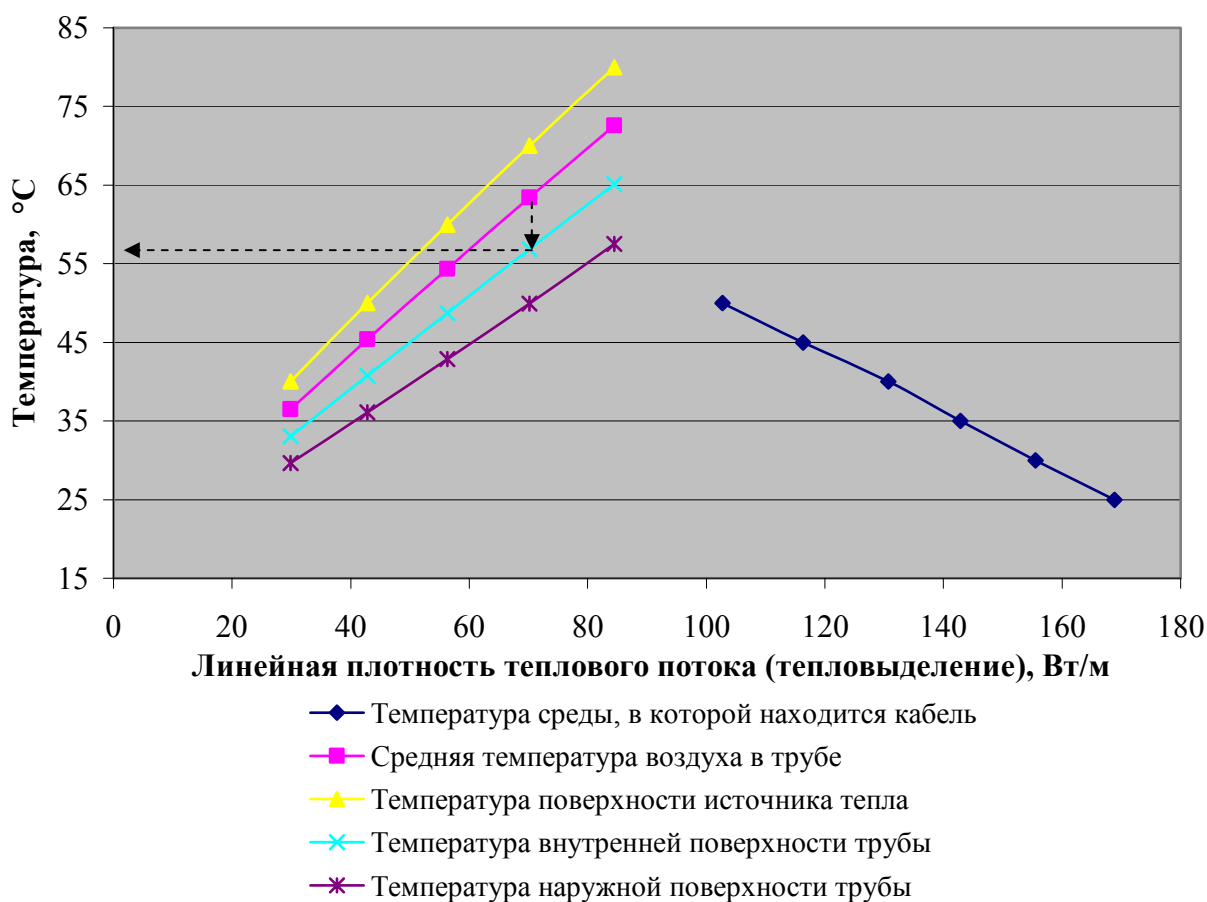
### 4.31 Тепловыделение кабеля

|                                  |        |        |        |        |        |        |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Температура окружающей среды, °С | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     |
| Тепловыделение кабеля, Вт/м      | 168,81 | 155,57 | 142,88 | 130,73 | 116,29 | 102,70 |

### 4.32 Результаты теплового расчета трубы

|  |        |       |       |       |       |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| Температура поверхности тепловыделяющего тела, °С    | 40     | 50    | 60    | 70    | 80    |
| Условное термическое сопротивл. гофры-грунта, м·К/Вт | 0,600  | 0,597 | 0,594 | 0,591 | 0,589 |
| Термическое сопротивление стенки трубы, м·К/Вт       | 0,0048 |       |       |       |       |
| Термическое сопротивлен. воздушной прослойки, м·К/Вт | 0,233  | 0,215 | 0,201 | 0,188 | 0,176 |
| Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт    | 0,838  | 0,817 | 0,799 | 0,784 | 0,769 |
| Температура внутренней поверхности трубы, °С         | 33,06  | 40,78 | 48,72 | 56,83 | 65,13 |
| Температура наружной поверхности гофры, °С           | 29,62  | 36,11 | 42,90 | 49,95 | 57,50 |
| Линейная плотность теплового потока, Вт/м            | 29,85  | 42,85 | 56,31 | 70,20 | 84,48 |
| Коэффициент конвекции воздушной прослойки в трубе    | 1,18   | 1,23  | 1,25  | 1,26  | 1,26  |
| Эффективный коэфф. теплопроводности гофры, Вт/м·К    | 0,106  | 0,114 | 0,122 | 0,129 | 0,137 |
| Эффективная толщина воздушной прослойки трубы, м     | 0,015  |       |       |       |       |
| Средняя температура воздуха в трубе, °С              | 36,53  | 45,39 | 54,36 | 63,41 | 72,57 |

### Графики температурного режима



Графики температуры среды, где находится кабель, и средней температуры воздуха в прослойке не пересекаются. Расчетная температура стенки трубы .... 56 °С