

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

CAPATOB 2008

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**



ГРУППА
ПОЛИПЛАСТИК

СОДЕРЖАНИЕ

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



ГРУППА
ПОЛУПЛАСТИК

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 кабелеводов 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 $+25\ldots 50^{\circ}\text{C}$ (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°C (в соответствии с максимальной температурой жилы кабелей +90°C). А в качестве минимальной – температура +40°C (так как при такой температуре тела температура трубы будет явно меньше допустимых +60). В результате получаем зависимость, представленную на рисунке 2.2

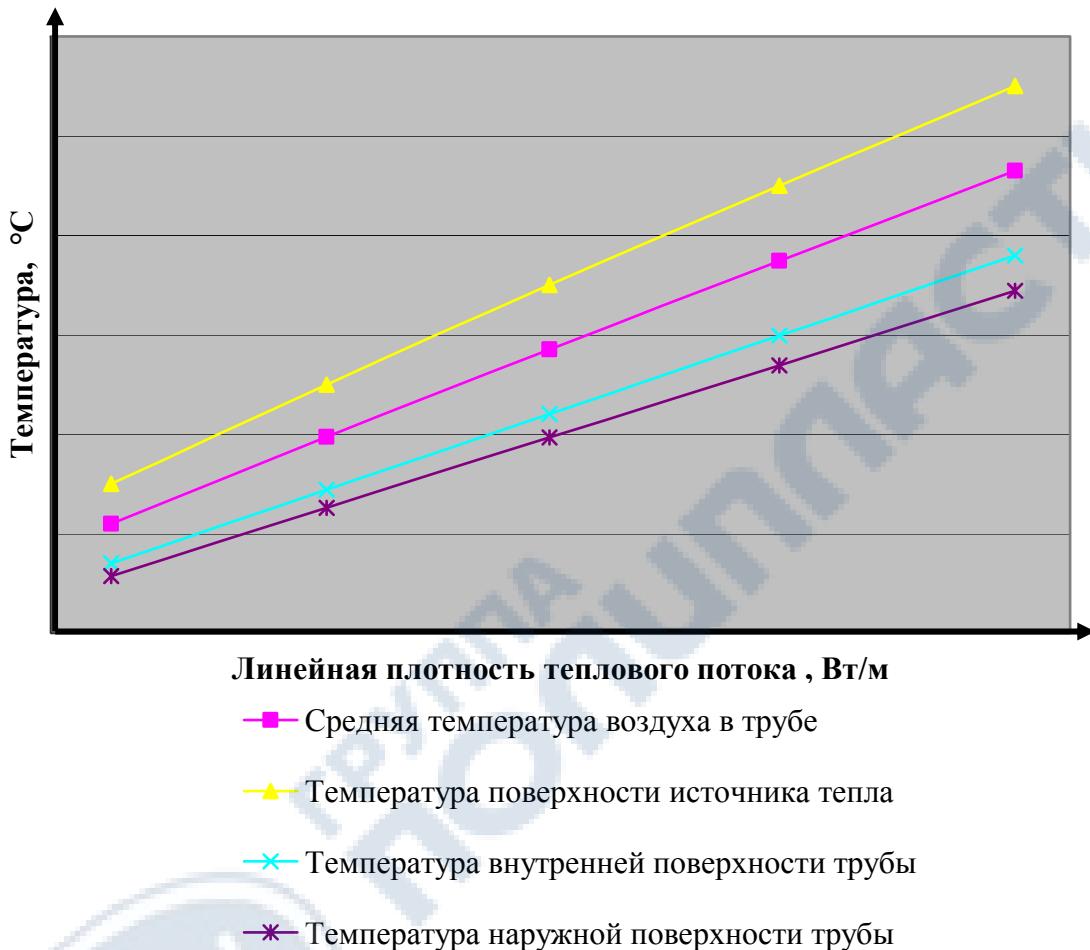


Рисунок 2.2

Далее накладываем зависимость 1 на зависимость 2. Точка пересечения линии средней температуры 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°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).

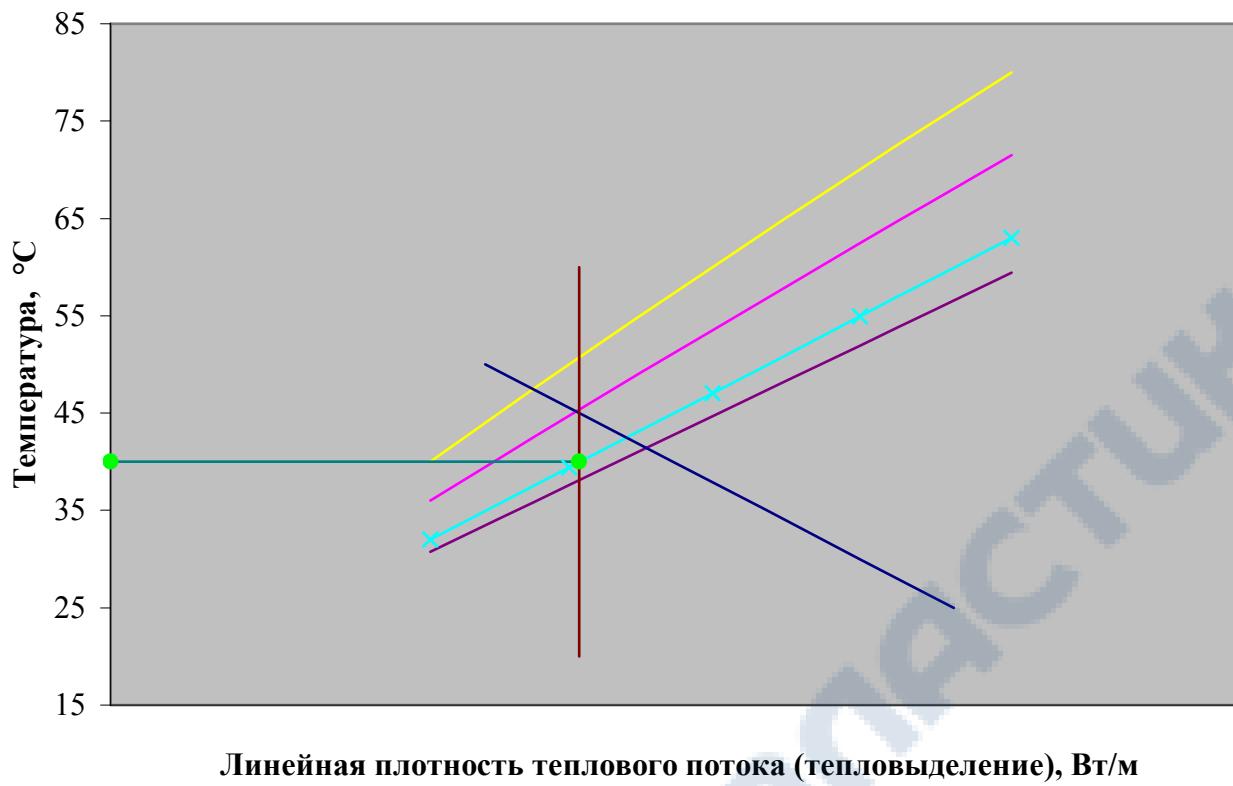


Рисунок 2.3

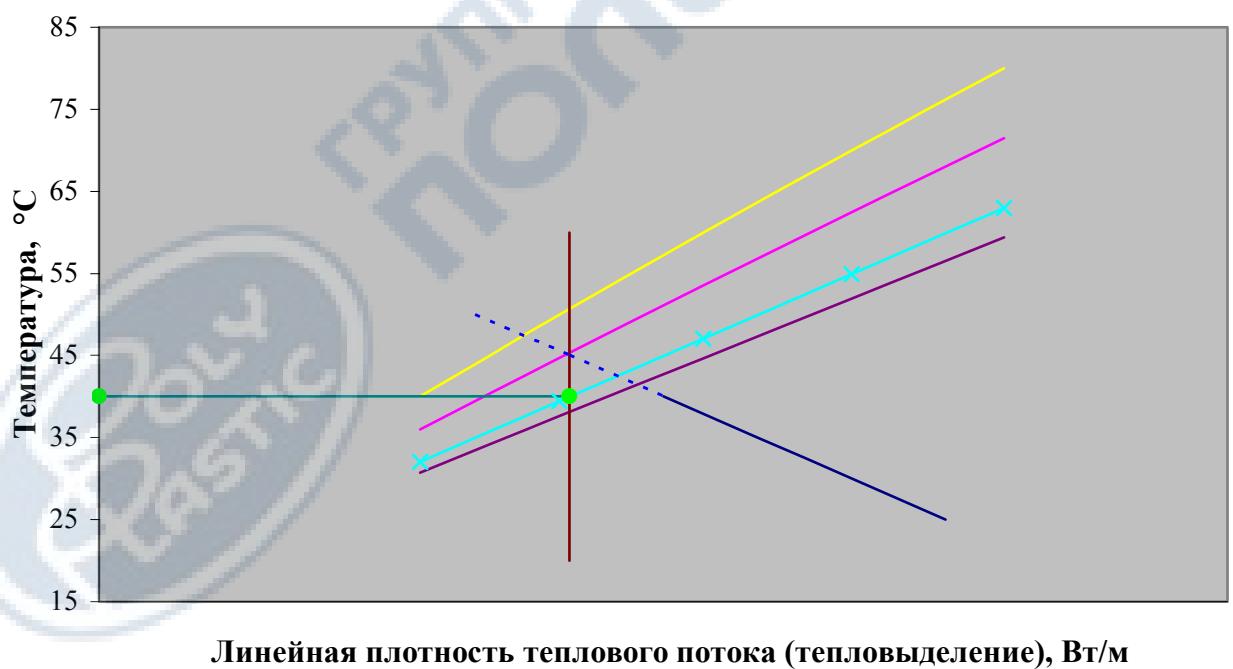


Рисунок 2.4

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^2	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^2	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^2	Длительно допустимый ток при прокладке в воздухе (температура воздуха +25°C), А
АПвПу 1x 185/35-110	64	185	451
АПвВу 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^2	Длительно допустимый ток при прокладке в воздухе (температура воздуха +25°C), А
АПвПу 1x 630/150-220	107	630	931
АПвВу 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^2	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^2	Длительно допустимый ток при прокладке в воздухе (температура воздуха +25°C), А
ААШвУ 3x50	37	3 x 70	105
ААШвУ 3x240	54	3 x 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_τ 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];

τ – 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^2	Сопротивление жилы постоянному току при 20°C	Допустимая температура жилы, °C	Сопротивление жилы при допустимой температуре, Ом/км
АПвПу 3x50/16-10	50	0,641	90	0,801
АПвПу 3x240/25-10	240	0,125	90	0,156
АПвПу 1x 50/16-35	50	0,641	90	0,801
АПвПу 1x 800/35-35;	800	0,0367	90	0,046
АПвПу 1x 185/35-110;	185	0,164	90	0,205
АПвВнг 1x1000/35-110	1000	0,0291	90	0,036
АПвВнг 1x630/150-220	630	0,0464	90	0,058
АПвВнг 1x1000/150-220	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^2	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^2	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_τ - 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 спитого 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, °C	25	30	35	40	45	50
Поправочный коэффициент	1	0,96	0,92	0,88	0,830	0,78
Марка кабеля	Допустимый ток, A	Тепловыделение одного кабеля, Вт/м				
АПвПу 1x 50/16-35	195	30,46	28,07	25,78	23,58	20,98
АПвПу 1x 800/35-35;	1070	52,50	48,39	44,44	40,66	36,17
АПвПу 1x 185/35-110;	451	41,68	38,41	35,28	32,28	28,71
АПвВнг 1x1000/35-110	1244	56,27	51,86	47,63	43,58	38,76
АПвВнг 1x630/150-220	931	50,25	46,31	42,53	38,92	34,62
АПвВнг 1x1000/150-220	1215	53,68	49,47	45,43	41,57	36,98
АНХСМК-W 3x70/35-20	235	94,43	87,03	79,93	73,13	65,06
АНХСМК-W 3x240/70-20	510	124,85	115,06	105,67	96,68	86,01
		Тепловыделение трех кабелей, лежащих в общей трубе, Вт/м				
АПвПу 1x 50/16-35	195	91,37	84,20	77,33	70,75	62,94
АПвПу 1x 800/35-35;	1070	157,50	145,16	133,31	121,97	108,51
АПвПу 1x 185/35-110;	451	125,04	115,24	105,84	96,83	86,14
АПвВнг 1x1000/35-110	1244	168,81	155,57	142,88	130,73	116,29
АПвВнг 1x630/150-220	931	150,76	138,94	127,60	116,75	103,86
АПвВнг 1x1000/150-220	1215	161,03	148,41	136,30	124,70	110,93

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

Температура воздуха в трубе, °C	25	30	35	40	45	50
Поправочный коэффициент	1,00	0,93	0,85	0,76	0,66	0,54
Марка кабеля	Допустимый ток, A	Тепловыделение одного кабеля, Вт/м				
ААШвУ 3x50	105	22,59	19,54	16,32	13,05	9,84
ААШвУ 3x240	270	31,06	26,86	22,44	17,94	13,53

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 $\lambda_{\text{гр}} = 0,83 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Внутри цилиндрической оболочки различной конструкции находится линейный источник тепловой энергии (электрический кабель) мощностью q_1 , $\text{Вт}/\text{м}$ (смотри рис. 2.5)

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

$$\Delta t = t_{\text{п.каб}} - t_{\text{гр}} = q_1 \cdot (R_{l \text{ в.пр}} + R_{l \text{ ст}} + R_{l \text{ гр}}),$$

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

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

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

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

$$\Delta t = t_{\text{вн.п.тр}} - t_{\text{гр}} = q_1 \cdot (R_{l \text{ гр}} + R_{l \text{ гр}})$$

Термическое сопротивление грунта, $(\text{м}\cdot\text{К})/\text{Вт}$,

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

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

χ - 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 $\chi = 1$

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

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

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

Термическое сопротивление стенки трубы-оболочки, $(\text{м}\cdot\text{К})/\text{Вт}$:

- для гладкой трубы-оболочки

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

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

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

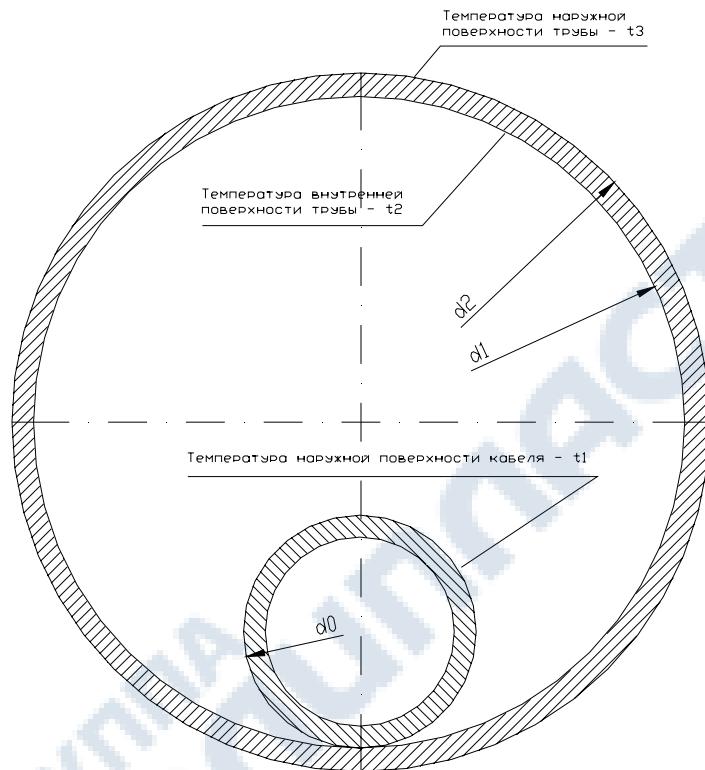


Рис. 1—Обозначения расчетных величин гладкой трубы

Рисунок 2.5

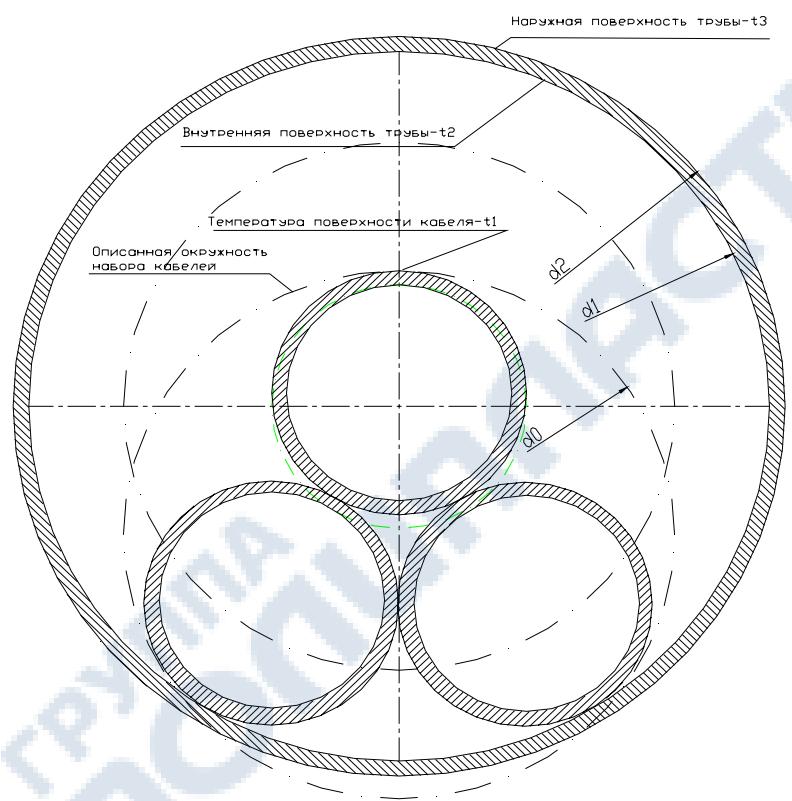


Рис. 2 – Обозначение расчетных величин гладкотрубной трубы с набором кабелей.

Рисунок 2.6

- для гофрированной трубы

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

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

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

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

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

Термическое сопротивление профицированной 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

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

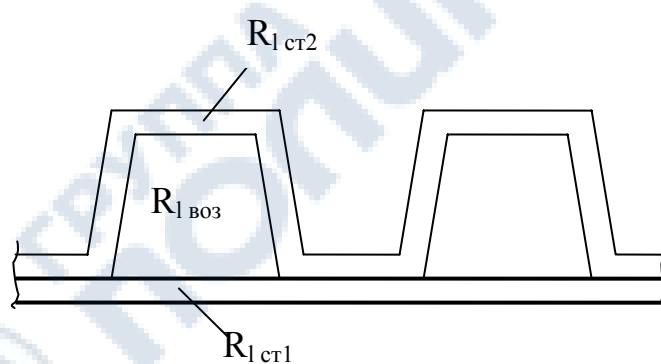


Рис. 2.7 – Термические сопротивления по ребру

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

$R_{l \text{ ст1}}$ и $R_{l \text{ ст2}}$ – рассчитываются аналогично $R_{l \text{ ст. гл.}}$ 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

$$\lambda_{\vartheta} = \lambda_k + \lambda_l$$

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

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

где ε_k – коэффициент конвекции, безразмерный

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

где Δt – перепад температур в воздушной прослойке, ^0C ;

- 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, ^0K ;

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

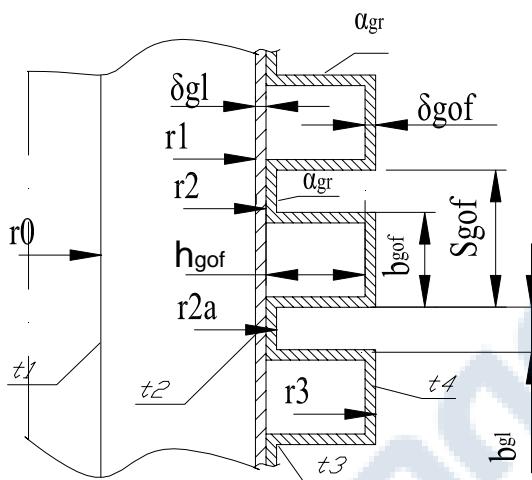


Рис. 4 – Распределение температуры и обозначение радиусов по сечению гофры.

Рисунок 2.8

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

δ – 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

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

D_1 - внутренний диаметр трубы-оболочки;

D_{onuc} - диаметр описанной окружности трех кабелей

$$D_{onuc} = D_o \left(1 + \frac{1}{\cos 30} \right)$$

Для одинакового диаметра всех трех кабелей

$$D_{onuc} = 2,155 D_0$$

$\delta_{\text{реб}}$ – 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

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

Значения «A» приведены в таблице [5].

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

В расчетной программе для ЭВМ ε_k рассчитывался аналогично:

Критерий Грасгофа

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

Критерий Прандтля для воздуха

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

При $Gr \cdot Pr > 1000$

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

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

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

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

$$\lambda_l = \alpha_l \cdot \frac{D_0}{2} \cdot \ln \frac{D_1}{D_0},$$

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

α_l - коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²·К).

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

T_1 и T_2 – температура абсолютная поверхности кабеля и тепловоспринимающей стенки трубы, ^0K ;

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

C_n – коэффициент взаимного излучения (обеих поверхностей), Вт/(м²·К⁴).

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

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 λ_s 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]

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

Температура на конце ребра [6]

$$\theta_2 = \theta_1 \frac{I0(m \cdot r_3) \cdot K1(m \cdot r_3) + I1(m \cdot r_3) \cdot K0(m \cdot r_3)}{I0(m \cdot r_2) \cdot K1(m \cdot r_3) + I1(m \cdot r_3) \cdot K0(m \cdot r_2)}.$$

Здесь

$$\psi = \frac{I1(m \cdot r_3) \cdot K1(m \cdot r_2) - I1(m \cdot r_2) \cdot K1(m \cdot r_3)}{I0(m \cdot r_2) \cdot K1(m \cdot r_3) + I1(m \cdot r_3) \cdot K0(m \cdot r_2)},$$

$I0(mr)$, $K0(mr)$ – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода нулевого порядка;

$I1(mr)$, $K1(mr)$ – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода первого порядка;

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

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

λ_s – 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;

$\theta_1 = t_3 - t_{\text{ср}}$ – избыточная температура в основании гофра, $^{\circ}\text{C}$;

t_3 – температура основания гофра, $^{\circ}\text{C}$;

t_{ep} - температура грунта, $^{\circ}\text{C}$;

$\theta_2 = t_4 - t_{ep}$ – избыточная температура вершины гофра, $^{\circ}\text{C}$;

t_4 – температура вершины гофра, $^{\circ}\text{C}$.

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

$$Q_{el} = \alpha_{reb} \cdot (t_3 - t_{ep}) \cdot H_{el},$$

где H_{el} – поверхность гладких участков трубы, приходящихся на 1 п. м. гофрированной трубы, m^2 ;

t_3 – температура наружной поверхности гладких участков гофрированной трубы, $^{\circ}\text{C}$.

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

$$Q_{reb.mp} = Q_p \cdot n_p + Q_{el},$$

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.

$$\alpha_{reb} = \left(E \cdot \frac{H_{reb}}{H_{pol}} + \frac{H_{el}}{H_{pol}} \right) \cdot \alpha$$

Коэффициент эффективности ребра

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

где h_{zof} – высота гофра, м.

Условное термическое сопротивление 1 п. м. гофрированной трубы, $\text{м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$

$$R_{ust} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot \lambda_z \cdot b_{zof} \cdot m \cdot \psi \cdot n_p \cdot r_1 + \alpha_{reb} \cdot H_{el}}.$$

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

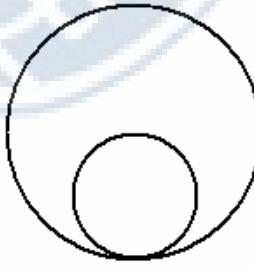
Марка и диаметр кабеля, мм	Тепловыделение, Вт/м при температуре:					
	25°	30°	35°	40°	45°	50°
 110/99	АПвПу 3x50/16-10 (46мм)	52,06	47,98	44,07	40,32	35,87
	АПвПу 1x 50/16-35 (38мм)	30,46	28,07	25,78	23,58	20,98
	ААШвУ 3x50 - 10 (37мм)	22,59	19,54	16,32	13,05	9,84
 125/113	ААШвУ 3x240 - 10 (54мм)	31,06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

Рисунок 2.8

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

**Марка
и диаметр кабеля, мм**

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

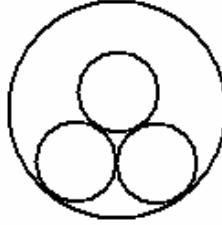
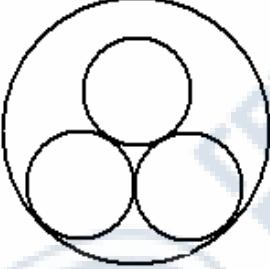
	25°	30°	35°	40°	45°	50°
3х АПвПу 1x 50/16-35 (38мм)  125/113	91,37	84,20	77,33	70,75	62,94	55,59
3х АПвПу 1x 800/35-35 (66мм) 3х АПвПу 1x 185/35-110 (64мм)  200/181	157,50 125,04	145,16 115,24	133,31 105,84	121,97 96,83	108,51 86,14	95,83 76,08
3х АПвПу 1x1000/35-110 (86мм)  250/226	168,81	155,57	142,88	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 наружный диаметр	SDR 26 S 12,5			SDR 21 S 10		
	номин. толщина	пред. откл.		номин. толщина	пред. откл.	
		1 сорт	2 сорт		1 сорт	2 сорт
110	4,2	+0,8 -0,1	+1,0 -0,2	5,3	+1,1 -0,2	+1,2 -0,3
125	4,8	+1,0 -0,2	+1,1 -0,3	6,0	+1,2 -0,2	+1,4 -0,3
140	5,4	+1,1 -0,2	+1,2 -0,3	6,7	+1,3 -0,2	+1,5 -0,3
160	6,2	+1,2 -0,2	+1,4 -0,3	7,7	+1,5 -0,3	+1,8 -0,4
180	6,9	+1,4 -0,2	+1,6 -0,4	8,6	+1,7 -0,3	+2,0 -0,5
200	7,7	+1,5 -0,3	+1,8 -0,4	9,6	+1,9 -0,3	+2,2 -0,5
225	8,6	+1,7 -0,3	+2,0 -0,5	10,8	+2,2 -0,4	+2,5 -0,6
250	9,6	+1,9 -0,3	+2,2 -0,5	11,9	+2,4 -0,4	+2,7 -0,6

Результаты расчета представлены в таблицах 2-5.

Таблица 2 – Расчет термических сопротивлений гладких труб

Номинальный наружный диаметр, $D_{нар}$ мм	Внутренний диаметр, мм		Термическое сопротивление грунта, $R_{l_{rp}}$, (м·К)/Вт	Термическое сопротивление стенки, $R_{l_{ct}}$, (м·К)/Вт		Термическое сопротивление $R_{l_{rp}} + R_{l_{ct}}$, (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 наружный диаметр, D _{нар} мм	SDR	Температурный перепад, $\Delta t = t_{\text{вн.п.тр}} - t_{\text{гр}}$, $^{\circ}\text{C}$									
		Тепловой поток, q _l , Вт/м									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	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	1082	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

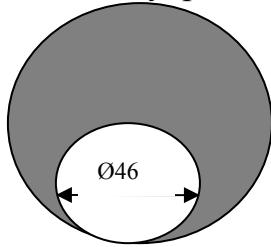
Так как по условию температура стенки не должна превышать 60°C , то Δt не должен превышать 45°C .

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

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

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

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



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

Принимаем расчетное тепловыделение кабеля $q_l=33,37$ Вт/м. при принятой средней температуре воздуха внутри оболочки $t_{\text{воз.ср}}=45^{\circ}\text{C}$.

Этому q_l соответствует $\Delta t_l=21,82^{\circ}\text{C}$

Тогда $t_{\text{вн.п.тр}}=t_{\text{тр}}+\Delta t_l=15+21,82=36,82^{\circ}\text{C}$

Температура поверхности кабеля

$$t_{\text{п.каб}}=2t_{\text{воз.ср}}-t_{\text{вн.п.тр}}=2 \cdot 45 - 36,82 = 53,15^{\circ}\text{C}$$

Тогда $\Delta t_{\text{воз.п}}=t_{\text{п.каб}}-t_{\text{вн.п.тр}}=53,15 - 36,82 = 16,33^{\circ}\text{C}$;

Коэффициент конвекции безразмерный

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

δ – усредненная геометрически толщина воздушной прослойки в трубе-оболочке,

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

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

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

Приведенный коэффициент излучения, Вт/(м²·К⁴).

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

Коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²·К)

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

Коэффициент теплопроводности излучением λ_i , Вт/(м·К),

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

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

$$\lambda_e=\lambda_k+\lambda_i=0,0624+0,0995=0,162$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Перерасчет при $t_{воз.ср} = 47,4 {}^{\circ}\text{C}$ 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

Показа тель	Диаметр трубы, мм											
	110		125		160				200		250	
	Диаметр, мм, и марка кабеля											
	37 ААШвУ 3*50-10	38 АПвПу 1*50/ 16-35	46 АПвПу 3*50/ 16-10	54 ААШвУ 3*240- 10	64 АПвПу 1*185/ 35-110	66 АПвПу 1*800/ 35-35	66 АНХАМК- W 3*70/35-20	70 АПвПу 3*240/ 25-10	86 АПвПу 1*1000/ 35-110	89 АНХАМК- W 3*240/70- 20	107 АПвПу 1*630/ 150-220	115 АПвПу 1*1000/ 150- 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 3*АПвПу 1*50/16-35		64*3 3*АПвПу 1*185/35-110		66*3 3*АПвПу 1*800/35-35		86*3 АПвПу 1*1000/35-110	
	По температуре воздуха 50°C	По тепловыделению кабеля $q_{каб}=f(t_{воз})$	По температуре воздуха 50°C	По тепловыделению кабеля $q_{каб}=f(t_{воз})$	По температуре воздуха 50°C	По тепловыделению кабеля $q_{каб}=f(t_{воз})$	По температуре воздуха 50°C	По тепловыделению кабеля $q_{каб}=f(t_{воз})$
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 ПВП

(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"

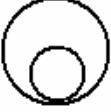
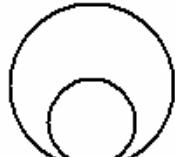
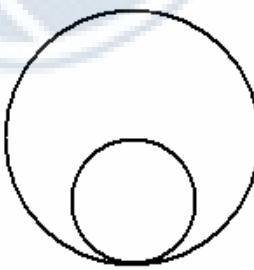
Марка и диаметр кабеля, мм	Тепловыделение, Вт/м при температуре:					
	25°	30°	35°	40°	45°	50°
 110/91	АПвПу 3x50/16-10 (46мм)	52,06	47,98	44,07	40,32	35,87
	АПвПу 1x 50/16-35 (38мм)	30,46	28,07	25,78	23,58	20,98
	ААШвУ 3x50 - 10 (37мм)	22,59	19,54	16,32	13,05	9,84
 125/107	ААШвУ 3x240 - 10 (54мм)	31,06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

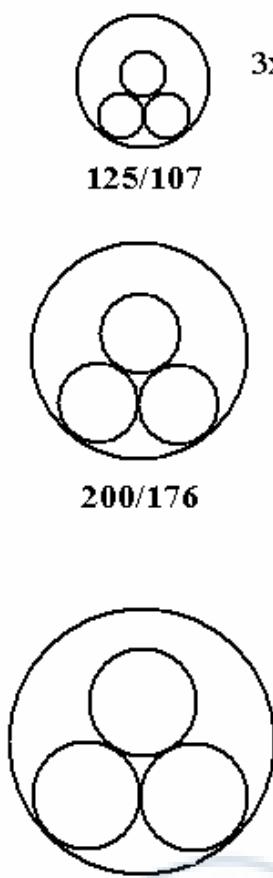
Рисунок 2.10

Трубы профилированные "Электрокор"

(3 кабеля в одной трубе)

Марка
и диаметр кабеля, мм

Тепловыделение, Вт/м
при температуре:



3х АПвПу 1x 50/16-35 (38мм)

3х АПвПу 1x 800/35-35 (66мм)
3х АПвПу 1x 185/35-110 (64мм)

3х АПвПу 1x1000/35-110 (86мм)

	25°	30°	35°	40°	45°	50°
3х АПвПу 1x 50/16-35 (38мм)	91,37	84,20	77,33	70,75	62,94	55,59
3х АПвПу 1x 800/35-35 (66мм)	157,50	145,16	133,31	121,97	108,51	95,83
3х АПвПу 1x 185/35-110 (64мм)	125,04	115,24	105,84	96,83	86,14	76,08
3х АПвПу 1x1000/35-110 (86мм)	168,81	155,57	142,88	130,73	116,29	102,70

Рисунок 2.11

Таблица 6 - Геометрические характеристики труб «Электрокор»

Размер трубы D_n/d_1	Толщина стенки гофра, e_3		Толщина стенки внутреннего слоя, e_5		Высота гофра, e_c	Толщина стенки, e_4	Шаг гофра, t	Ширина выступа гофра, 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 трубы D_n/d_1 Диаметр кабеля, мм	Тепловой поток, q_l , Вт/м									
	30		40		50		60		70	
	Термическое сопротивление $R_{ст-гр}$ (м·К)/Вт									
	Методика 1	Методика 2	Методика 1	Методика 2	Методика 1	Методика 2	Методика 1	Методика 2	Методика 1	Методика 2
<u>110/91</u> 37	0,798	0,790								
<u>125/107</u> 54			0,781	0,770						
<u>160/139</u> 66					0,730	0,724				
<u>200/176</u> 86							0,629	0,620		
<u>250/216</u> 115									0,603	0,591



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

Показа тель	Диаметр трубы, мм											
	110		125		160				200		250	
	Диаметр, мм, и марка кабеля											
	37 ААШвУ 3*50-10	38 АПвПу 1*50/ 16-35	46 АПвПу 3*50/ 16-10	54 ААШвУ 3*240- 10	64 АПвПу 1*185/ 35-110	66 АПвПу 1*800/ 35-35	66 АНХАМК-W 3*70/35-20	70 АПвПу 3*240/ 25-10	86 АПвПу 1*1000/ 35-110	89 АНХАМК-W 3*240/70- 20	107 АПвПу 1*630/ 150-220	115 АПвПу 1*1000/ 150- 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 3*АПвПу 1*50/16-35		64*3 3*АПвПу 1*185/35-110		66*3 3*АПвПу 1*800/35-35		86*3 3*АПвПу 1*1000/35-110	
	По температуре воздуха 50°C	По тепловыделению кабеля $q_{каб}=f(t_{воз})$	По температуре воздуха 50°C	По тепловыделению кабеля $q_{каб}=f(t_{воз})$	По температуре воздуха 50°C	По тепловыделению кабеля $q_{каб}=f(t_{воз})$	По температуре воздуха 50°C	По тепловыделению кабеля $q_{каб}=f(t_{воз})$
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 $\Delta t_1 = t_{вн.п.тр} - t_{тр}$ заметно увеличивается с ростом задаваемого теплового потока для всех диаметров труб (табл.3).

Так, для $D_{нап}=110$ мм SDR26 перепад Δt изменяется от $6,46^0\text{C}$ (при $q_l=10$ Вт/м) до $45,22^0\text{C}$ ($q_l=70$ Вт/м);

- для $D_{нап}=250$ мм SDR21 перепад Δt изменяется от $4,97^0\text{C}$ ($q_l=10$ Вт/м) до $49,70^0\text{C}$ ($q_l=100$ Вт/м);

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

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

$D_{нап}$	q_l 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 $0,5^0\text{C}$ 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°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°C.

7.2 Для одного трехжильного кабеля 10кВ с изоляцией из спитого полиэтилена 39...44°C.

7.3 Для одного трехжильного кабеля 20кВ с изоляцией из спитого полиэтилена (марки Pirelli -Финляндия) 48...49°C.

7.4 Для одного одножильного кабеля 35кВ с изоляцией из спитого полиэтилена 33...39°C.

7.5 Для одного одножильного кабеля 110кВ с изоляцией из спитого полиэтилена 37...38°C.

7.6 Для одного одножильного кабеля 220кВ с изоляцией из спитого полиэтилена 37...38°C.

7.7 Для трех одножильных кабелей 35кВ с изоляцией из спитого полиэтилена 50...54°C.

7.8 Для трех одножильных кабелей 110кВ с изоляцией из спитого полиэтилена 52...56°C.

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

8. Таким образом, при прокладке в полимерной трубе как с гладкой стенкой, так и с профилированной стенкой ЭЛЕКТРОКОР одного одно- или трехжильного кабеля температура трубы не превышает +50°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 3x50 10кВ

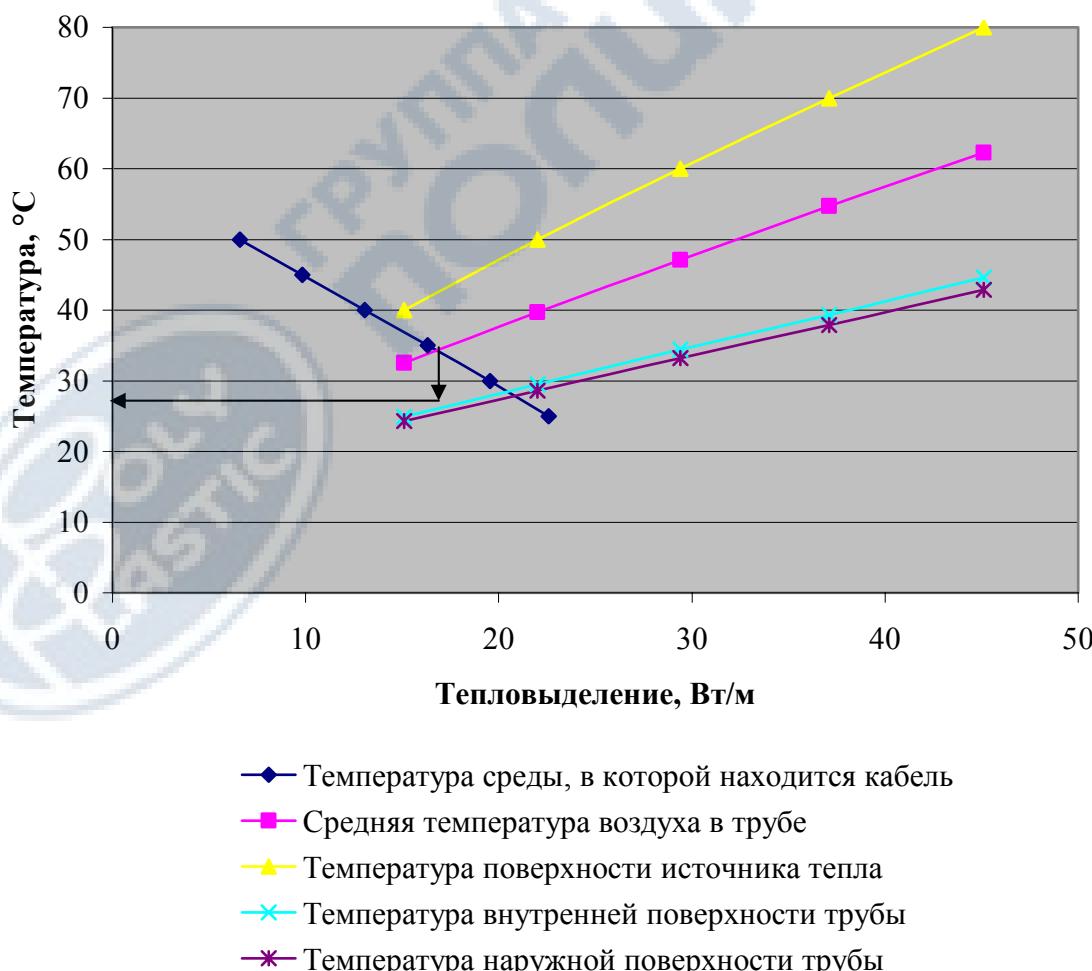
Таблица 3.1 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	24,9	29,5	34,3	39,3	44,6
Температура наружной поверхности трубы, °C	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, °C	32,5	39,7	47,1	54,7	62,3

График температурного режима



Расчетная температура стенки трубы ..., 27 °C

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

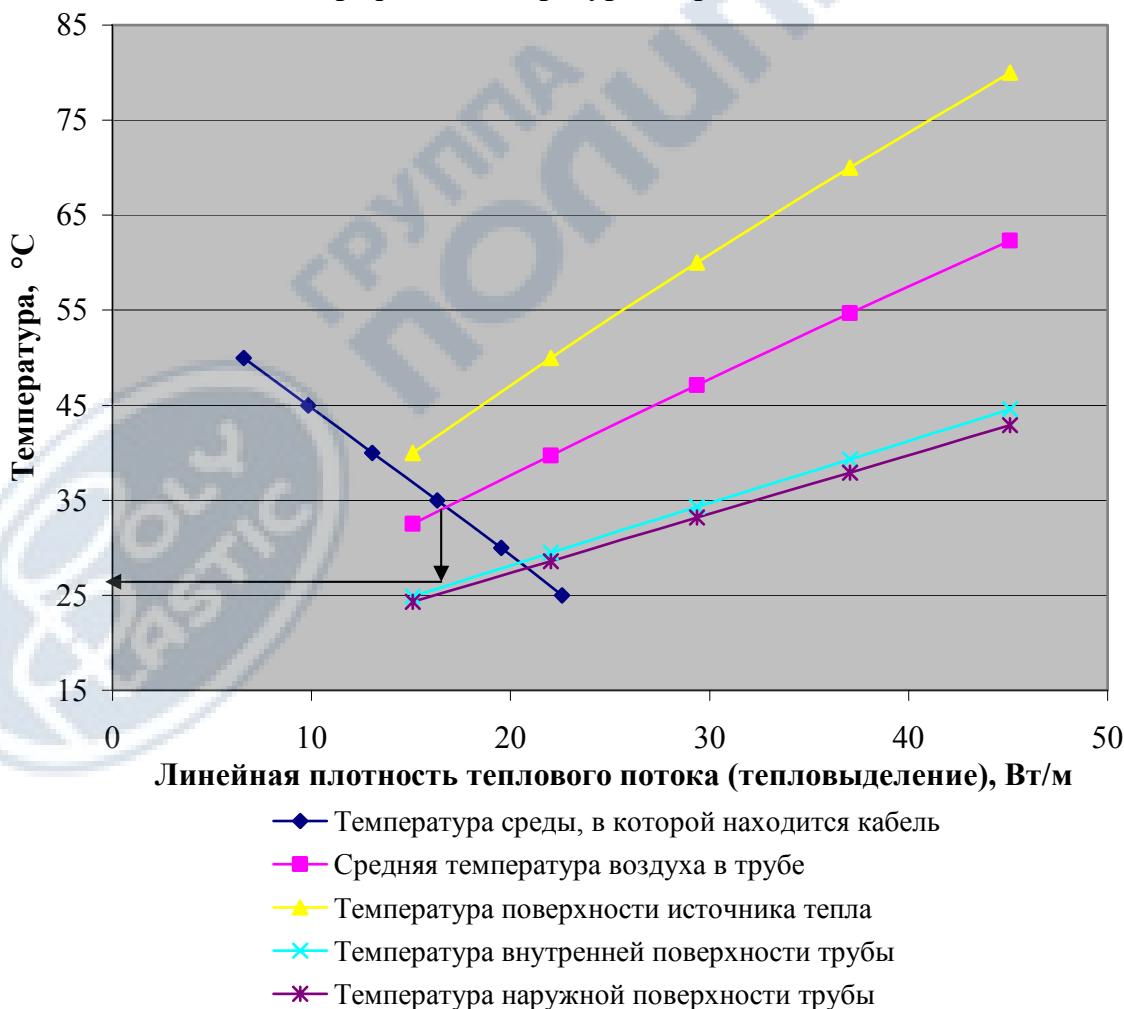
Таблица 3.3 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	26,6	31,9	37,4	43,2	49,2
Температура наружной поверхности трубы, °C	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, °C	33,3	40,9	48,7	56,6	64,6

Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы ..., 27 °C

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

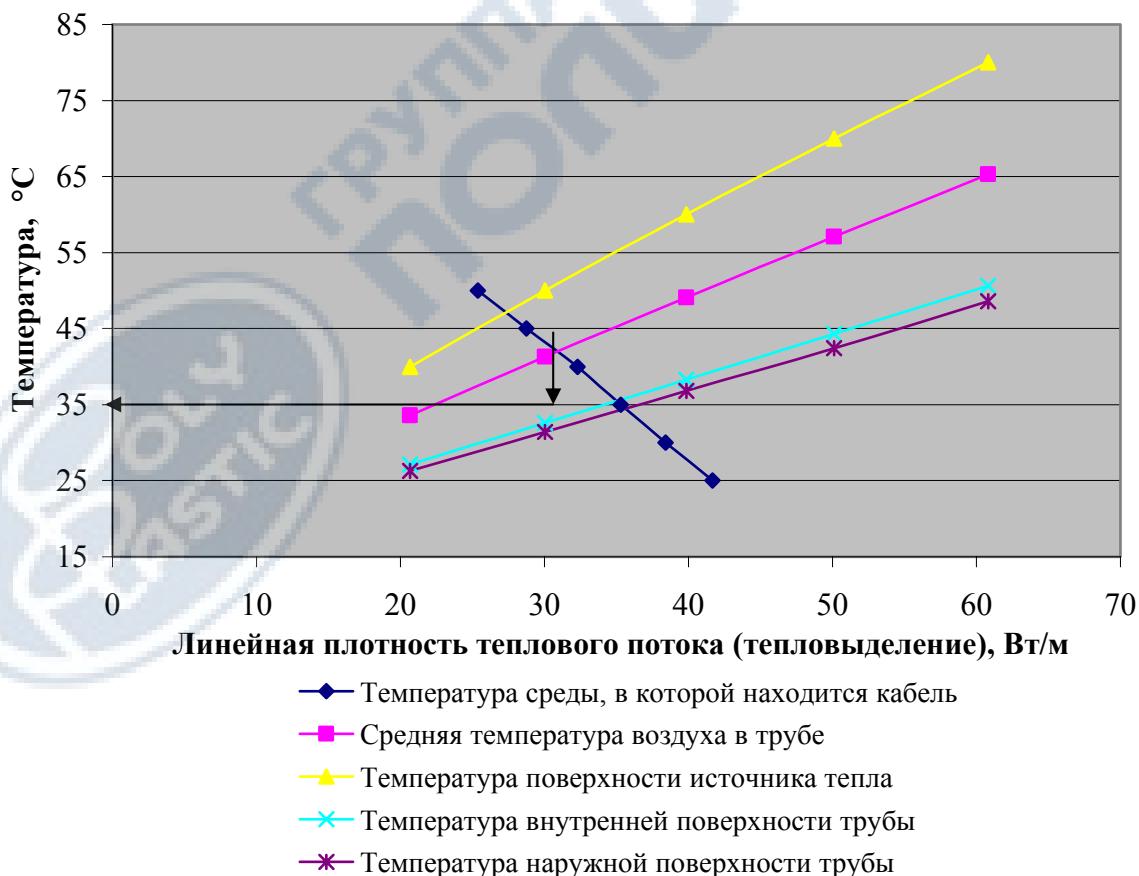
Таблица 3.5 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	27,1	32,6	38,3	44,3	50,6
Температура наружной поверхности трубы, °C	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, °C	33,6	41,3	49,1	57,1	65,3

Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы ..., 33 °C

1.4 Труба SDR21 (D=110мм); кабель АПвПУ 3x50/16-10кВ

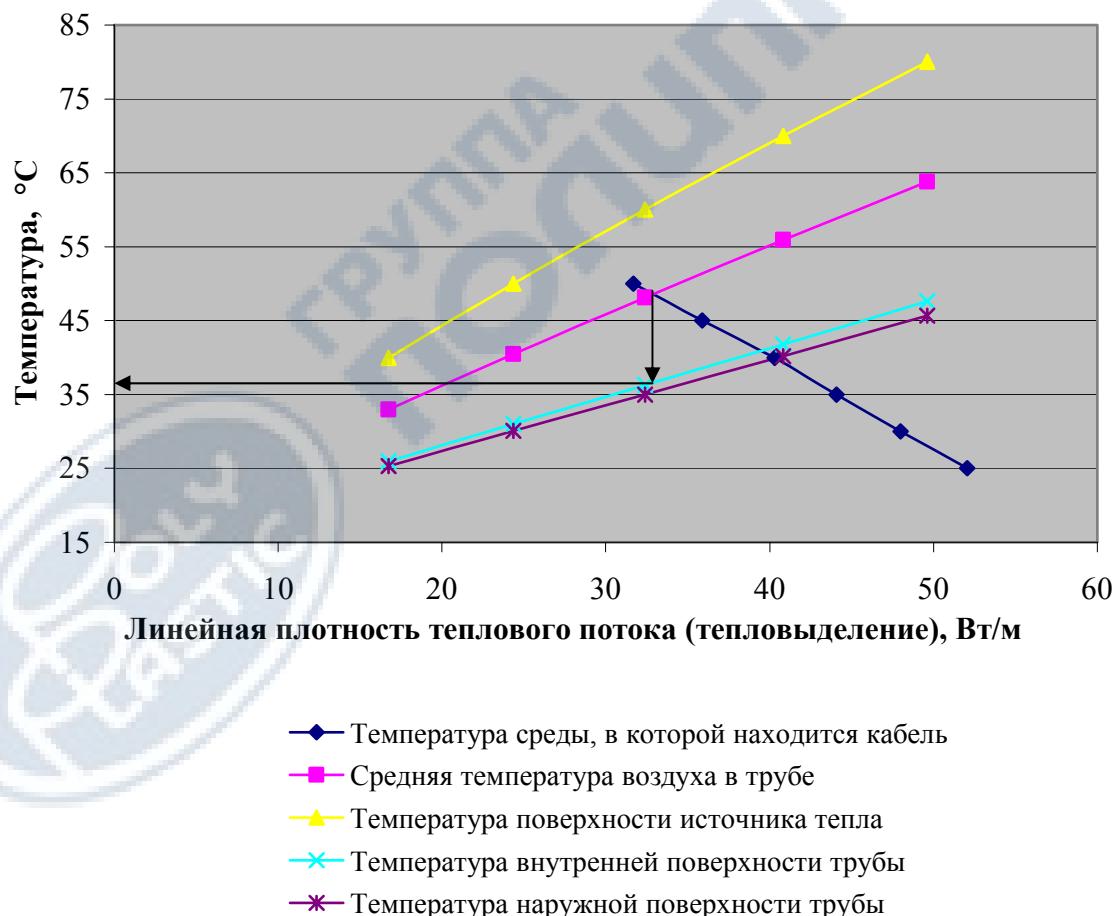
Таблица 3.7 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	27,1	32,6	38,3	44,3	50,6
Температура наружной поверхности трубы, °C	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, °C	33,6	41,3	49,1	57,1	65,3

Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы ..., 37 °C

1.5 Труба SDR21 (D=110мм); кабель АПвПУ 1x50/16-35кВ

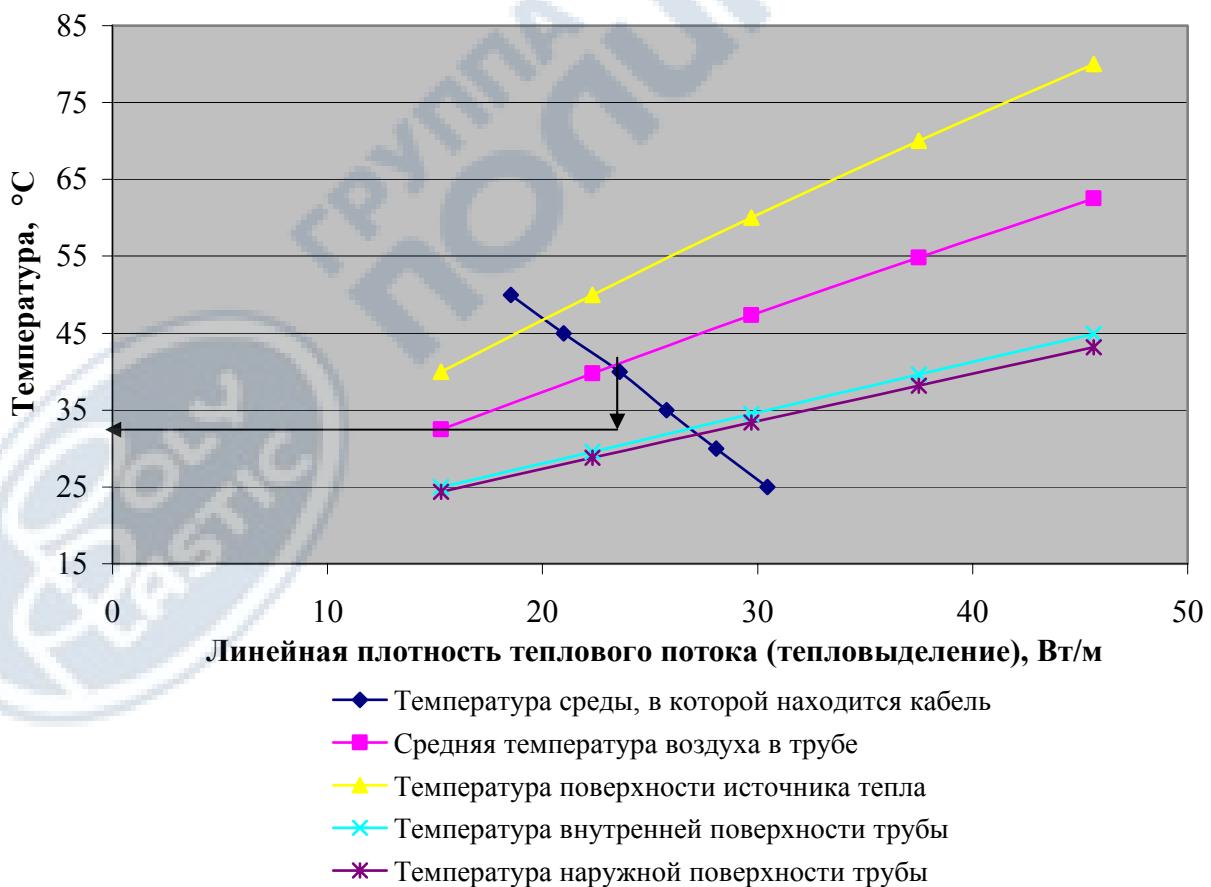
Таблица 3.9 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	25,0	29,6	34,5	39,6	44,9
Температура наружной поверхности трубы, °C	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, °C	32,5	39,8	47,3	54,8	62,5

Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы ..., 30 °C

1.6 Труба SDR21 (D=160мм); кабель АПвПУ 1x800/35-35кВ

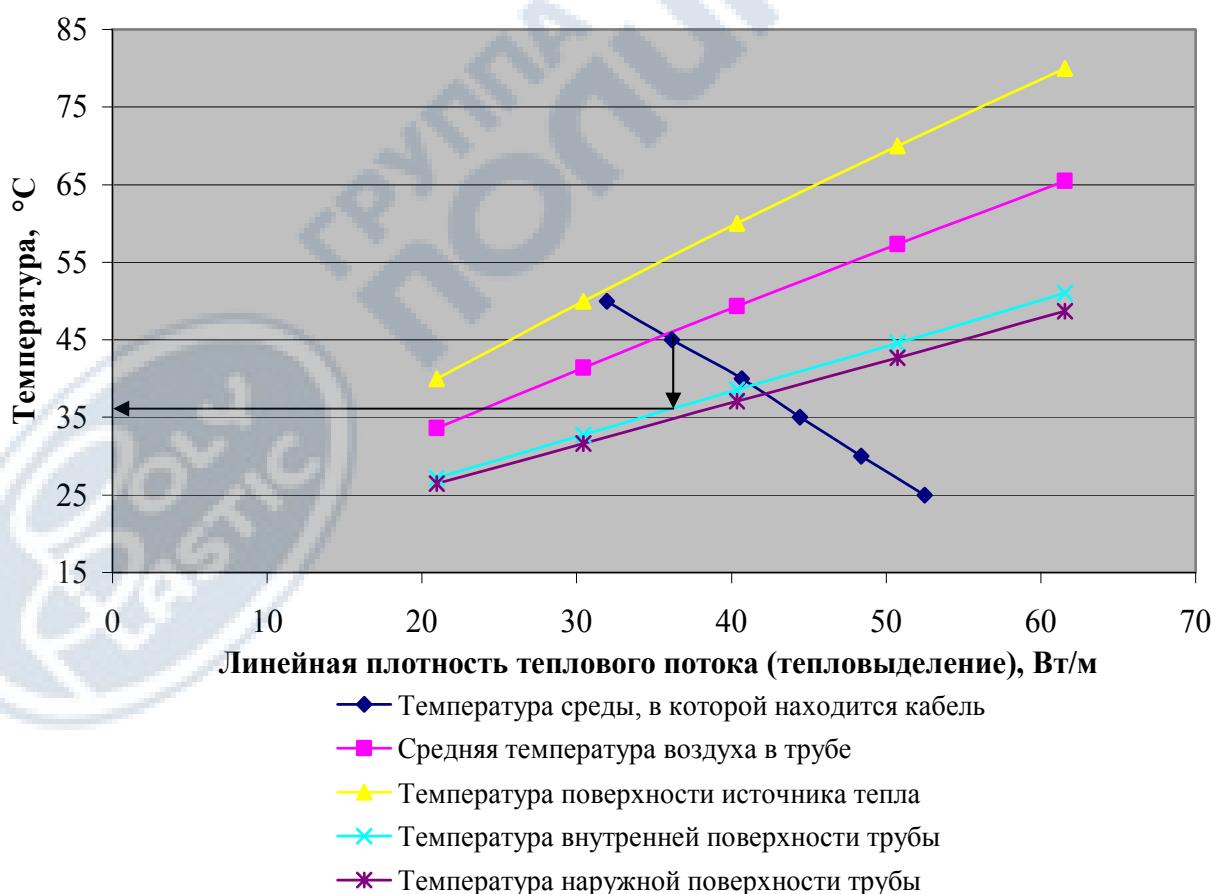
Таблица 3.11 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	27,2	32,8	38,6	44,6	51,0
Температура наружной поверхности трубы, °C	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, °C	33,6	41,4	49,3	57,3	65,5

Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы ..., 36 °C

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

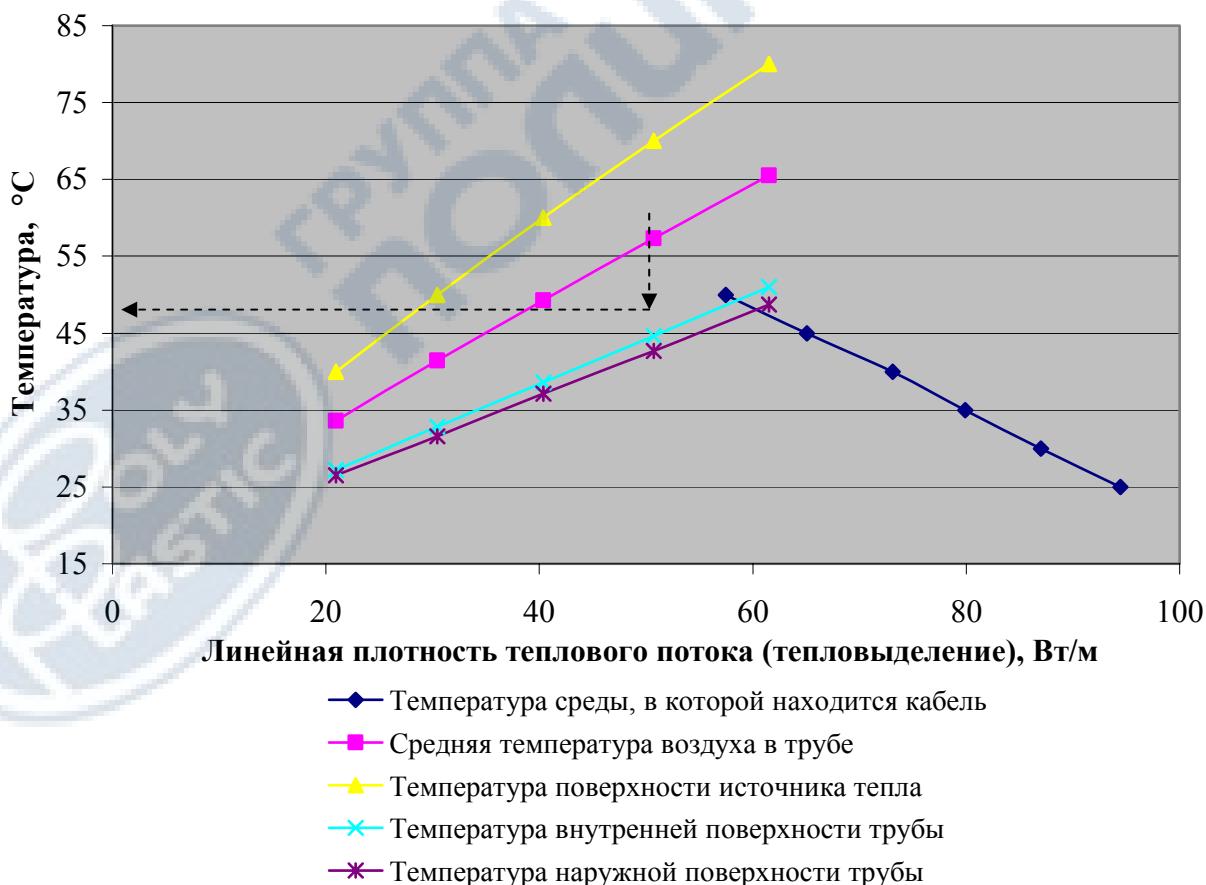
Таблица 3.13 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	27,2	32,8	38,6	44,6	51,0
Температура наружной поверхности трубы, °C	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, °C	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 °C

1.8 Труба SDR21 (D=160мм); кабель АПвПУ 3x240/25-10кВ

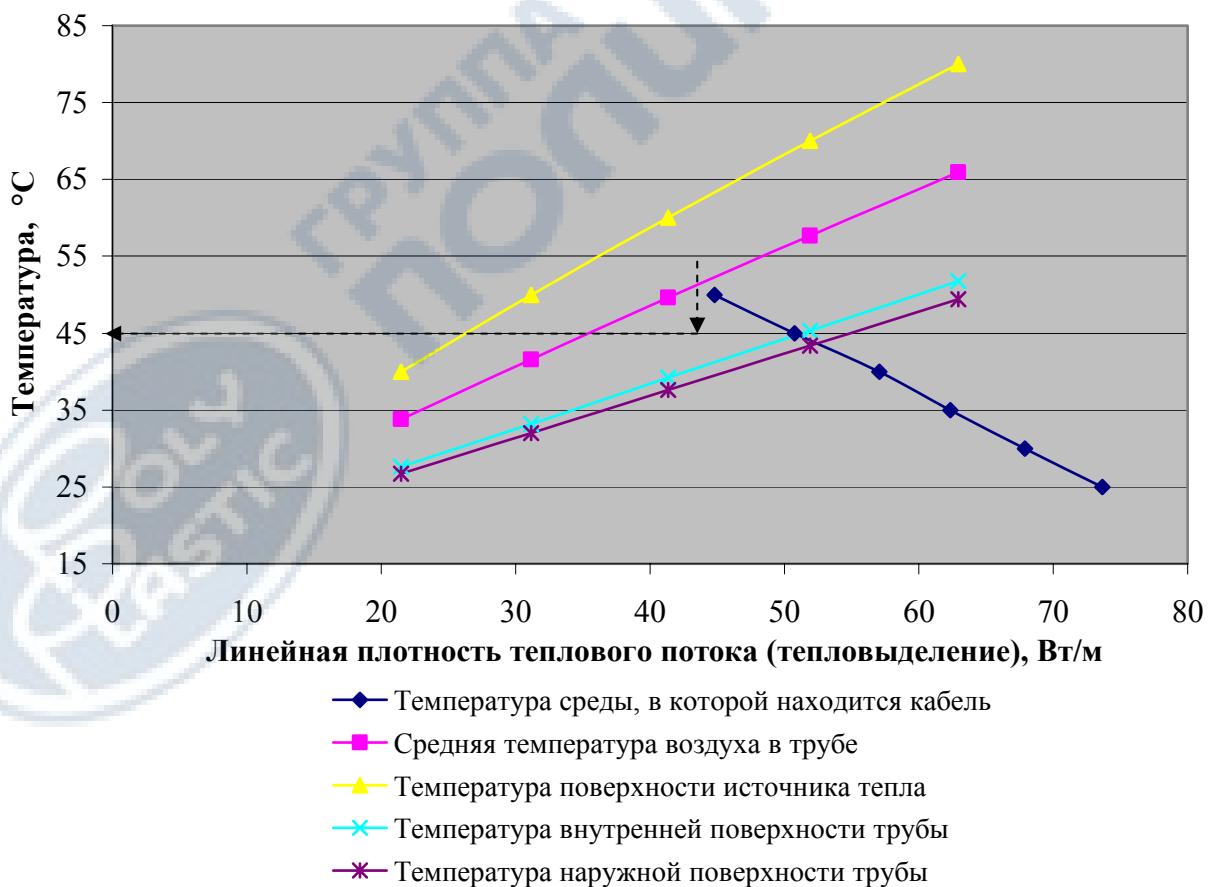
Таблица 3.15 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	27,6	33,2	39,2	45,3	51,8
Температура наружной поверхности трубы, °C	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, °C	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 °C

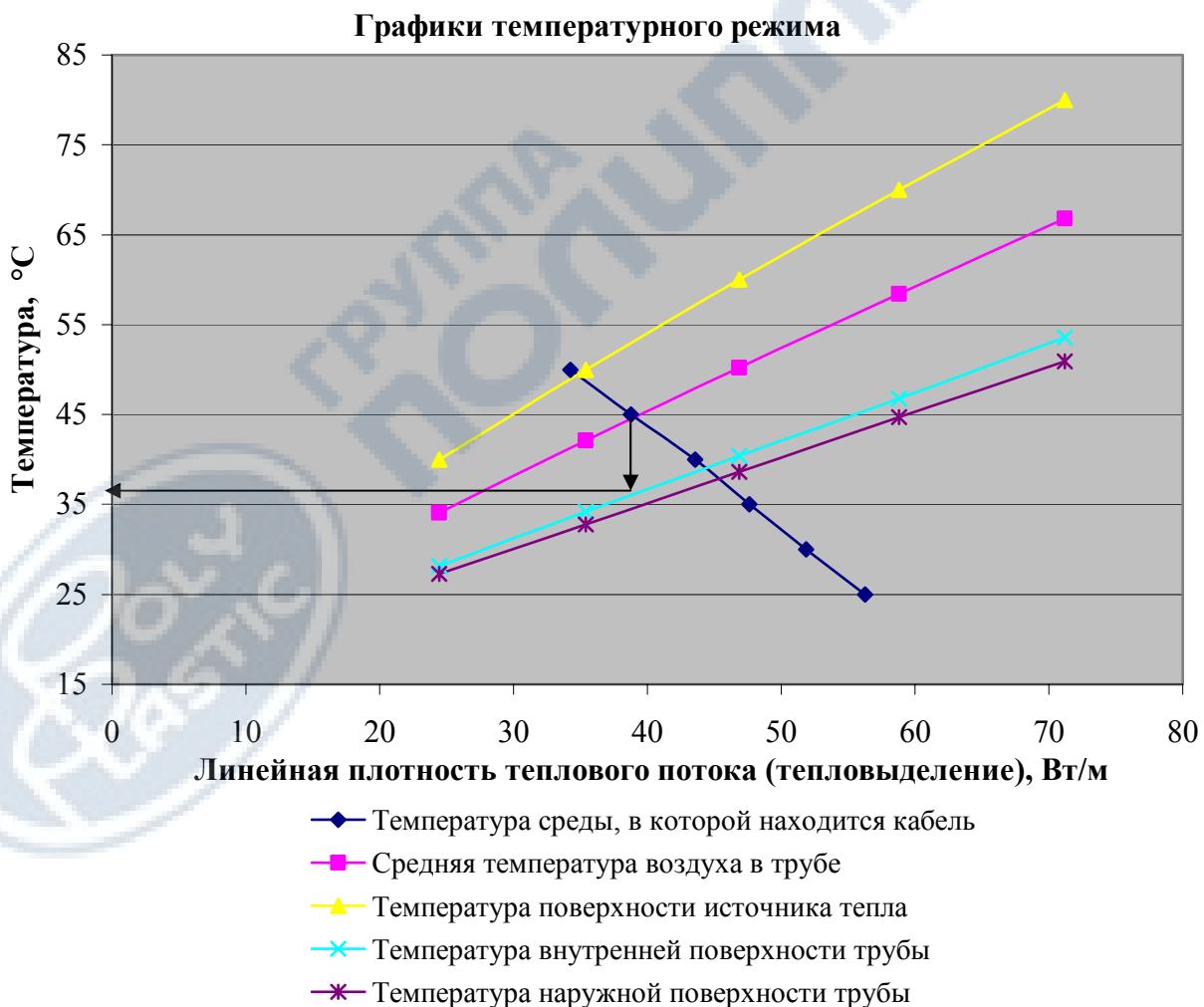
1.9 Труба SDR21 (D=200мм); кабель АПвПУ 1x1000/35-110кВ

Таблица 3.17 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	28,2	34,2	40,4	46,8	53,6
Температура наружной поверхности трубы, °C	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, °C	34,1	42,1	50,2	58,4	66,8



Расчетная температура стенки трубы ... 37 °C

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

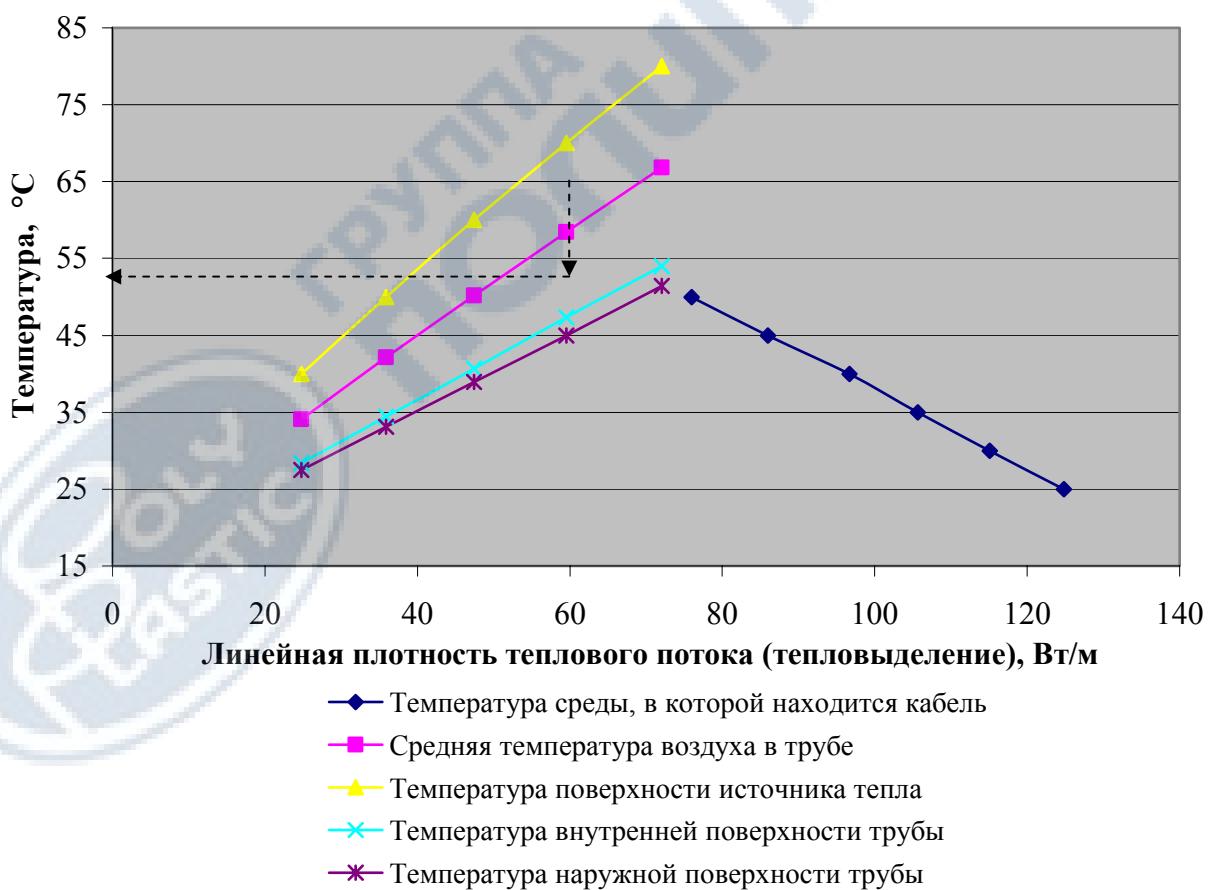
Таблица 3.19 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	28,4	34,4	40,7	47,3	54,0
Температура наружной поверхности трубы, °C	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, °C	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 °C

1.11 Труба SDR21 (D=250 мм); кабель АПвПУ 1x630/150-220кВ

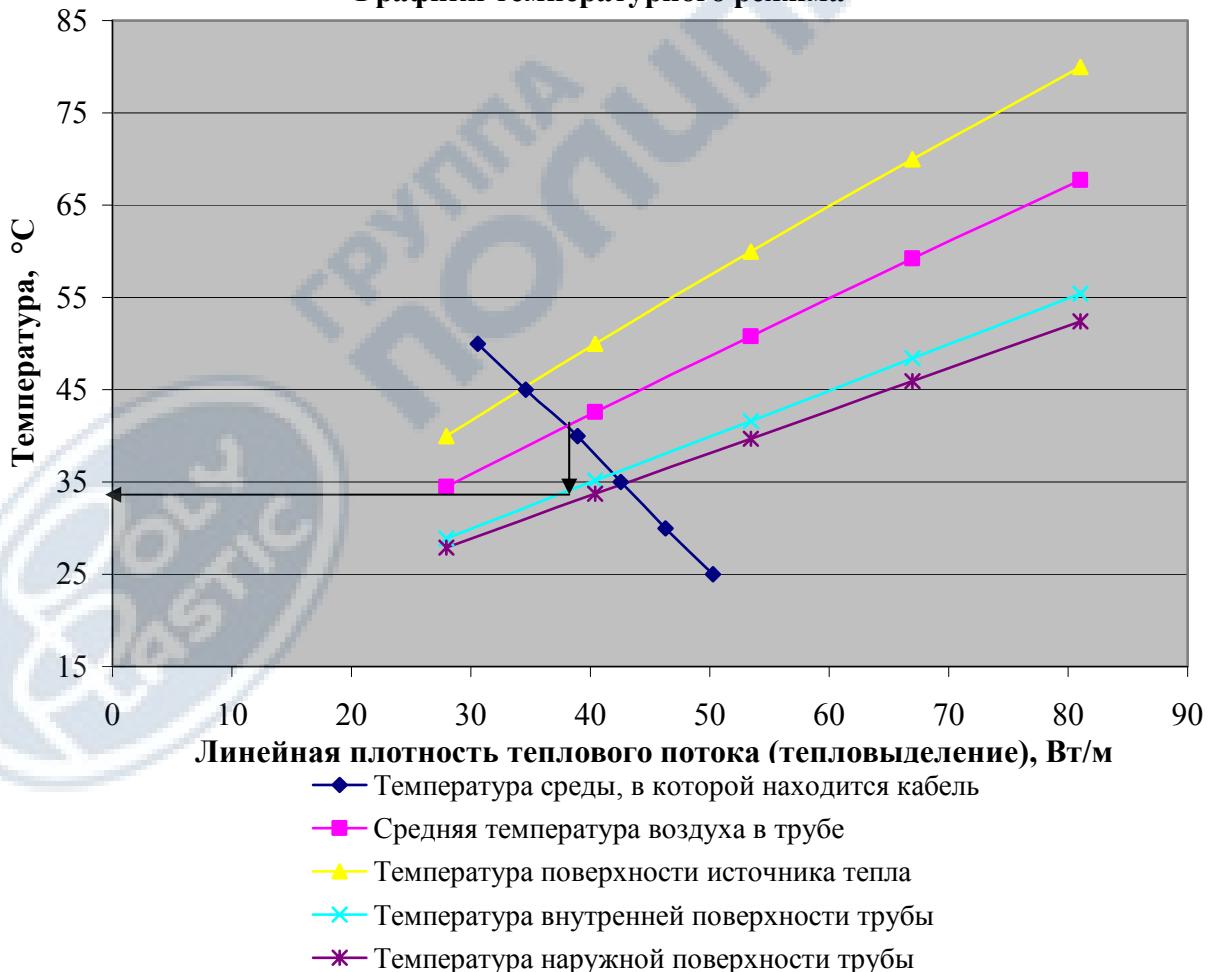
Таблица 3.21 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	28,9	35,2	41,6	48,4	55,4
Температура наружной поверхности трубы, °C	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, °C	34,5	42,58	50,8	59,2	67,7

Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы ... 34 °C

1.12 Труба SDR21 (D=250 мм); кабель АПвПУ 1x1000/150-220кВ

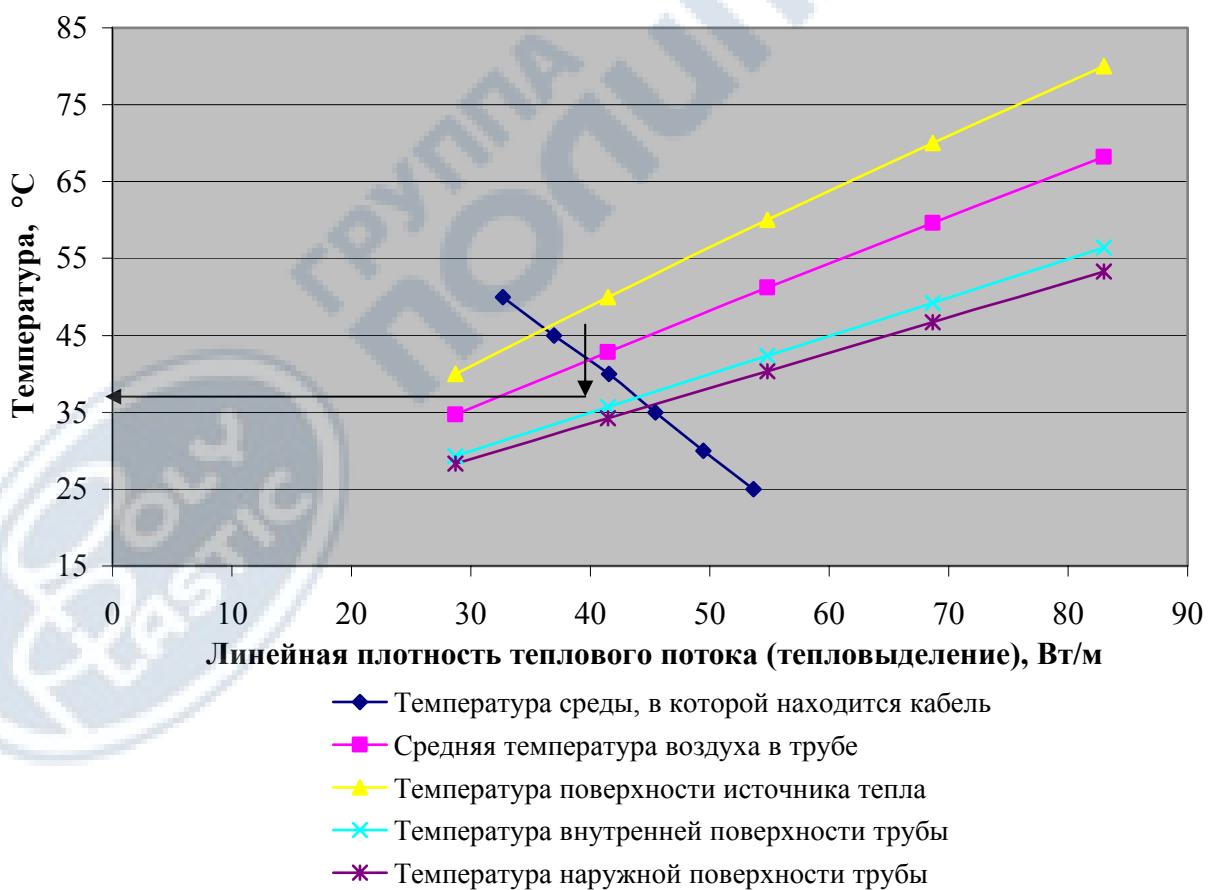
Таблица 3.23 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	29,3	35,7	42,3	49,2	56,4
Температура наружной поверхности трубы, °C	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, °C	34,7	42,8	51,2	59,6	68,2

Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы ... 35 °C

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

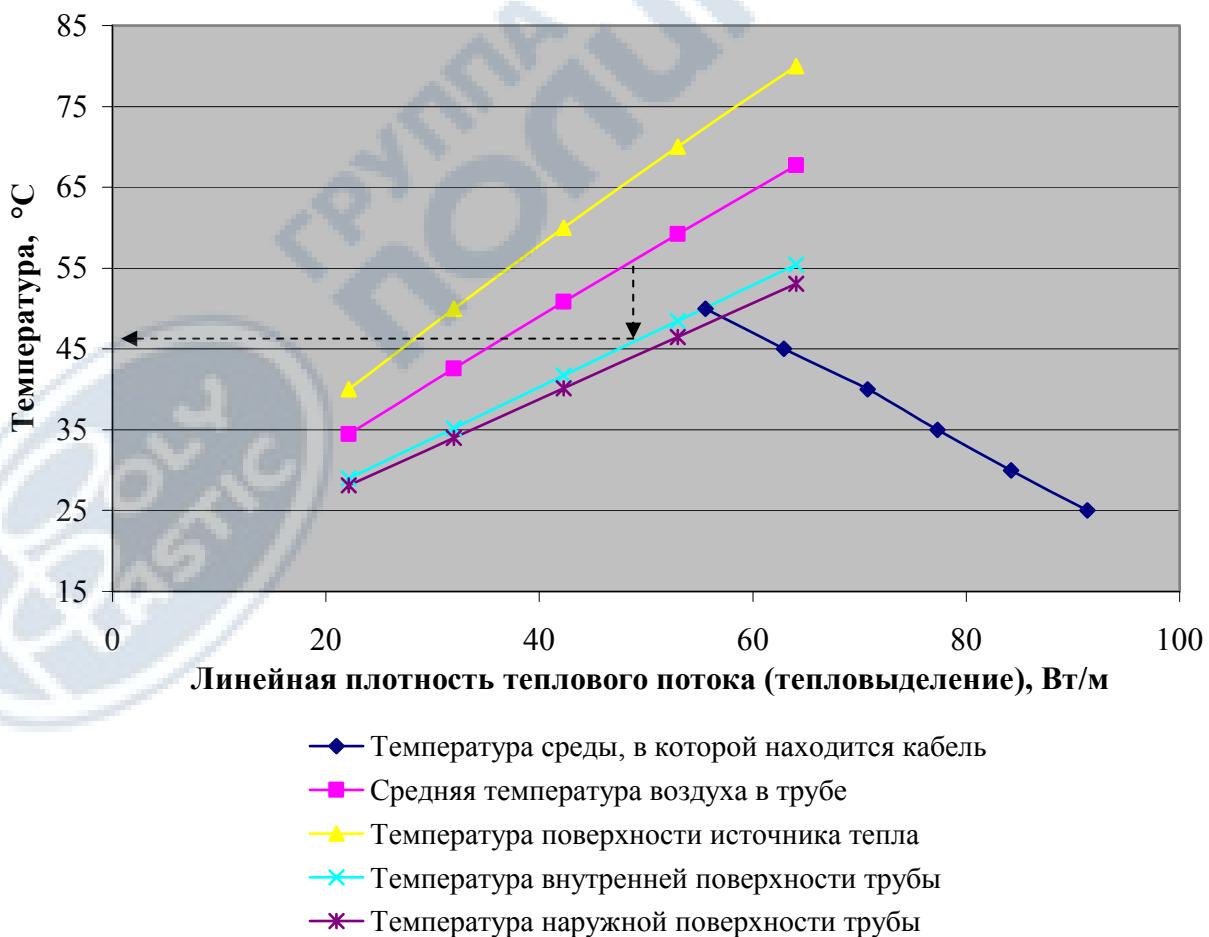
Таблица 3.25 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, $\text{м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$		0,5941			
Линейное термическое сопротивление трубы, $\text{м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$		0,0374			
Термическое сопротивлени. воздушной прослойки, $\text{м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$	0,498	0,463	0,433	0,407	0,383
Суммарное термическое сопротивление трубы, $\text{м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$	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, $\text{Вт}/\text{м}$	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, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	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 $45,3^\circ\text{C}$

1.14 Труба гладкая SDR21 (D=200мм); кабель 3*АПвПу 1x800/35-35кВ

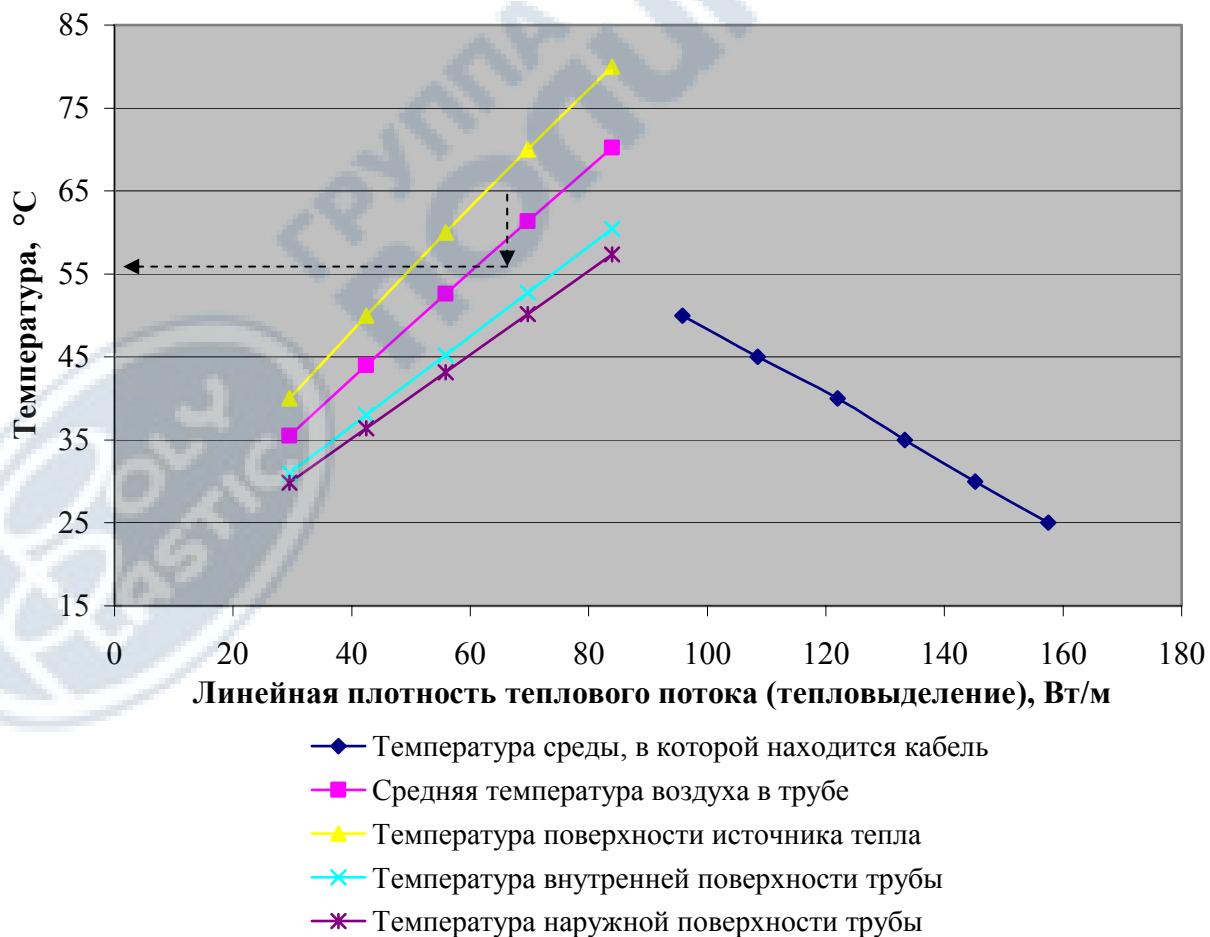
Таблица 3.27 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, $t_1, ^\circ\text{C}$	40	50	60	70	80
Линейное термическое сопротивление грунта, $\text{м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$			0,504		
Линейное термическое сопротивление трубы, $\text{м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$			0,0374		
Термическое сопротивлени. воздушной прослойки, $\text{м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$	0,305	0,283	0,264	0,248	0,233
Суммарное термическое сопротивление трубы, $\text{м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$	0,847	0,825	0,806	0,789	0,774
Температура внутренней поверхности трубы, $t_2, ^\circ\text{C}$	30,98	37,98	45,24	52,74	60,47
Температура наружной поверхности трубы, $t_3, ^\circ\text{C}$	29,88	36,40	43,16	50,14	57,33
Линейная плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}$	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, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$	0,133	0,144	0,154	0,164	0,175
Эффективная толщина воздушной прослойки, м			0,0204		
Средняя температура воздуха в трубе, $t_{\text{воз}}, ^\circ\text{C}$	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 $52,2^\circ\text{C}$

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

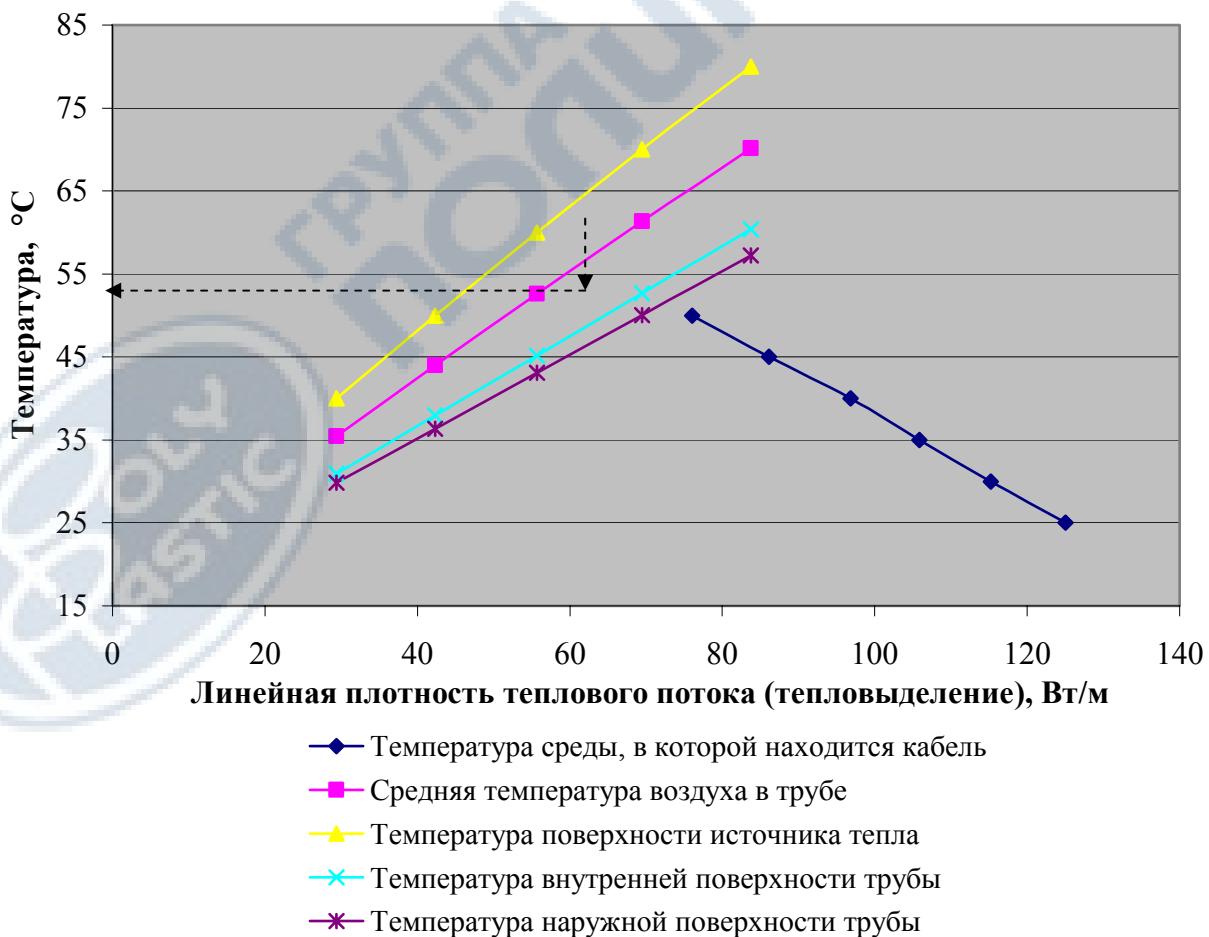
Таблица 3.29 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, $\text{м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$			0,5043		
Линейное термическое сопротивление трубы, $\text{м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$			0,0374		
Термическое сопротивлени. воздушной прослойки, $\text{м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$	0,308	0,285	0,266	0,250	0,234
Суммарное термическое сопротивление трубы, $\text{м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$	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, $\text{Вт}/\text{м}$	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, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$	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°C

1.16 Труба гладкая SDR21 (D=250мм); кабель 3*АПвПу 1x1000/35-110 кВ

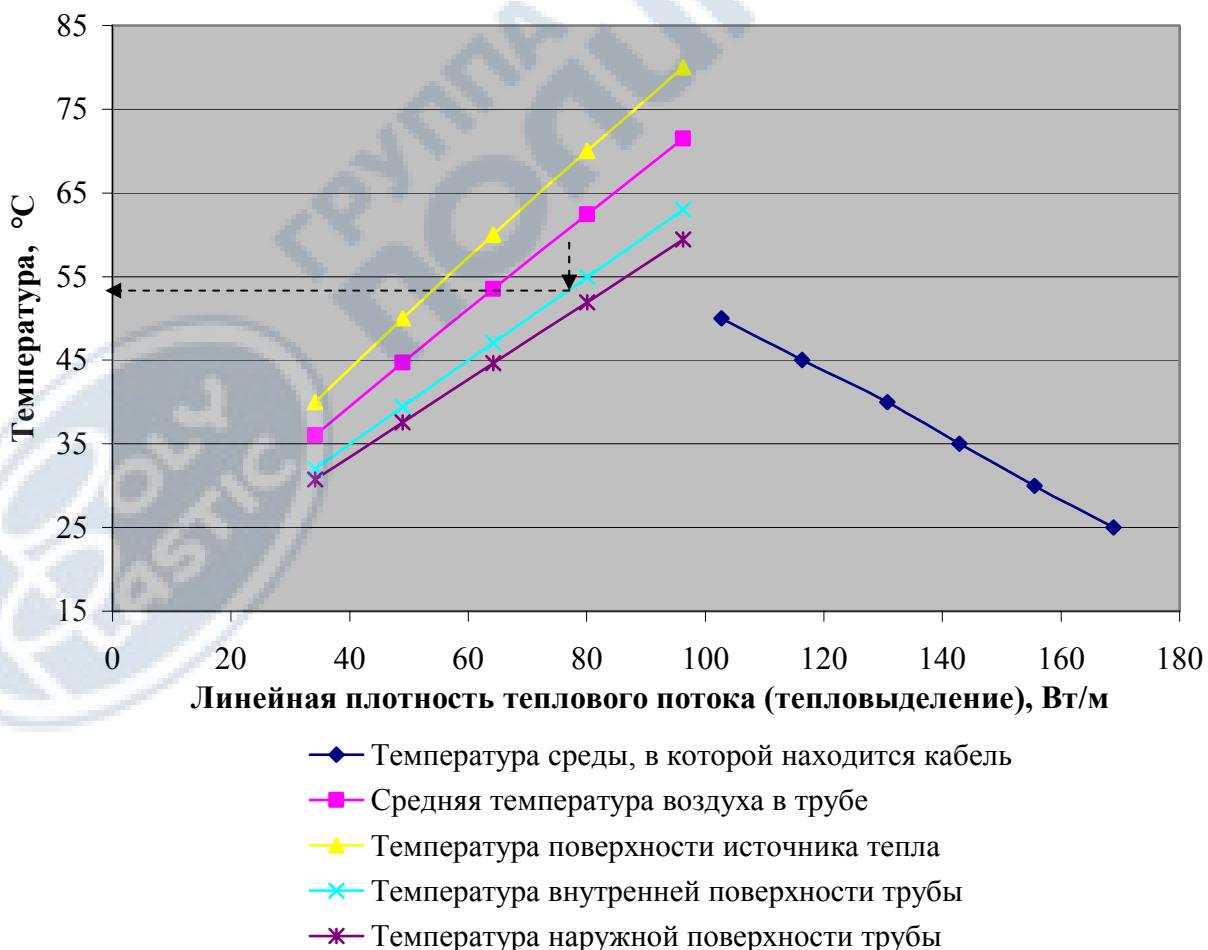
Таблица 3.31 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, $\text{м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$			0,4617		
Линейное термическое сопротивление трубы, $\text{м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$			0,037		
Термическое сопротивлени. воздушной прослойки, $\text{м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$	0,234	0,216	0,201	0,189	0,177
Суммарное термическое сопротивление трубы, $\text{м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$	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, $\text{Вт}/\text{м}$	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, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	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°C

2.1 Труба гофрированная SN8 (D=110мм); кабель ААШвУ 3x50 10кВ

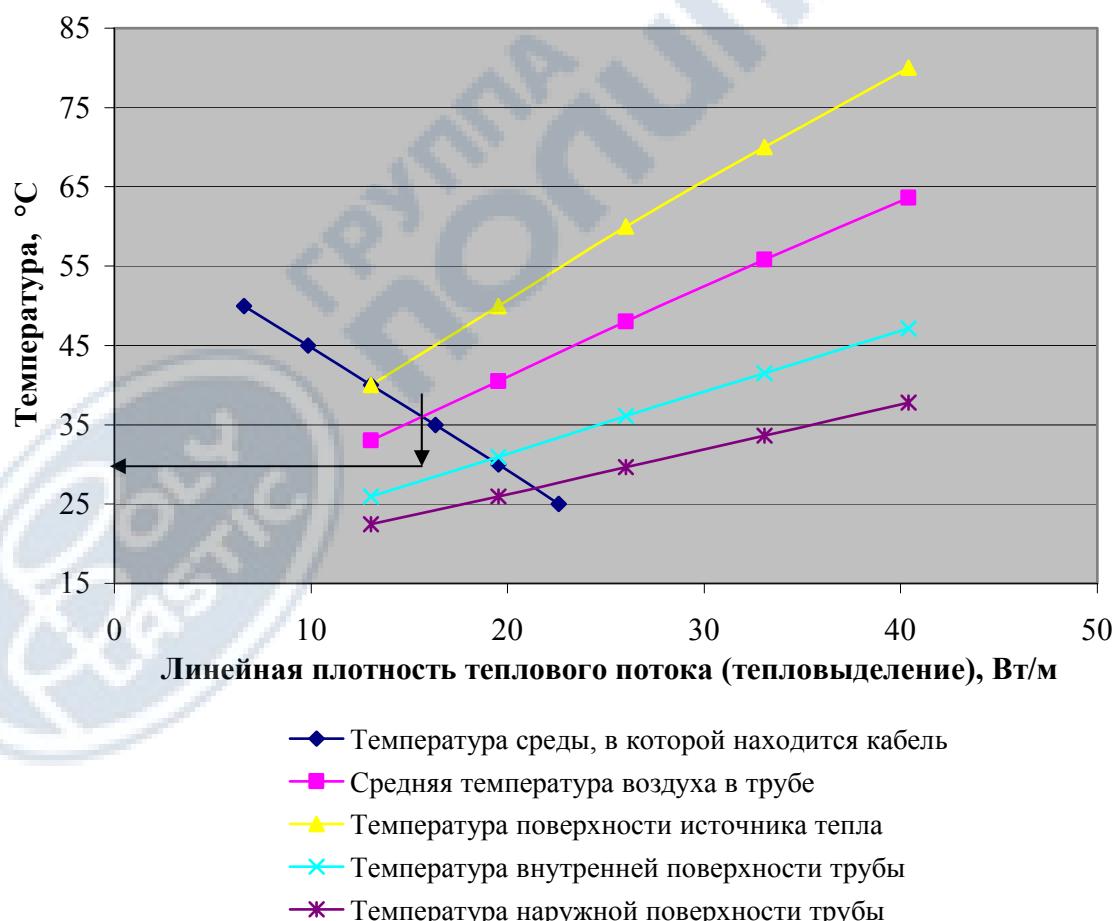
4.1 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	25,9	30,9	36,1	41,5	47,1
Температура наружной поверхности гофры, °C	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 коэффиц. 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, °C	33,0	40,5	48,0	55,8	63,6

Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы 28 °C

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

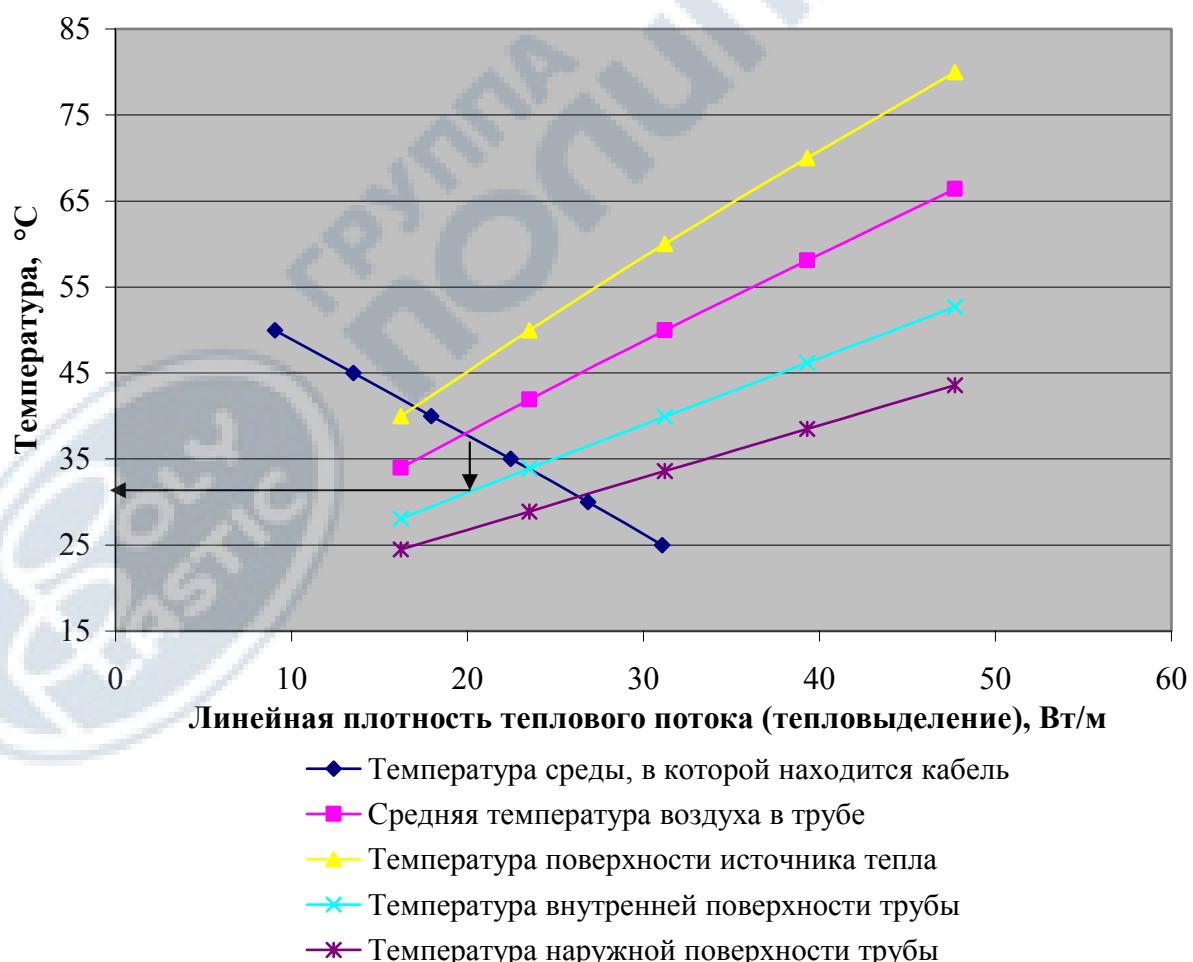
4.3 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	28,1	33,9	39,9	46,2	52,7
Температура наружной поверхности гофры, °C	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 коэффиц. 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, °C	34,0	41,9	50,0	58,1	66,4

Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы 31 °C

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

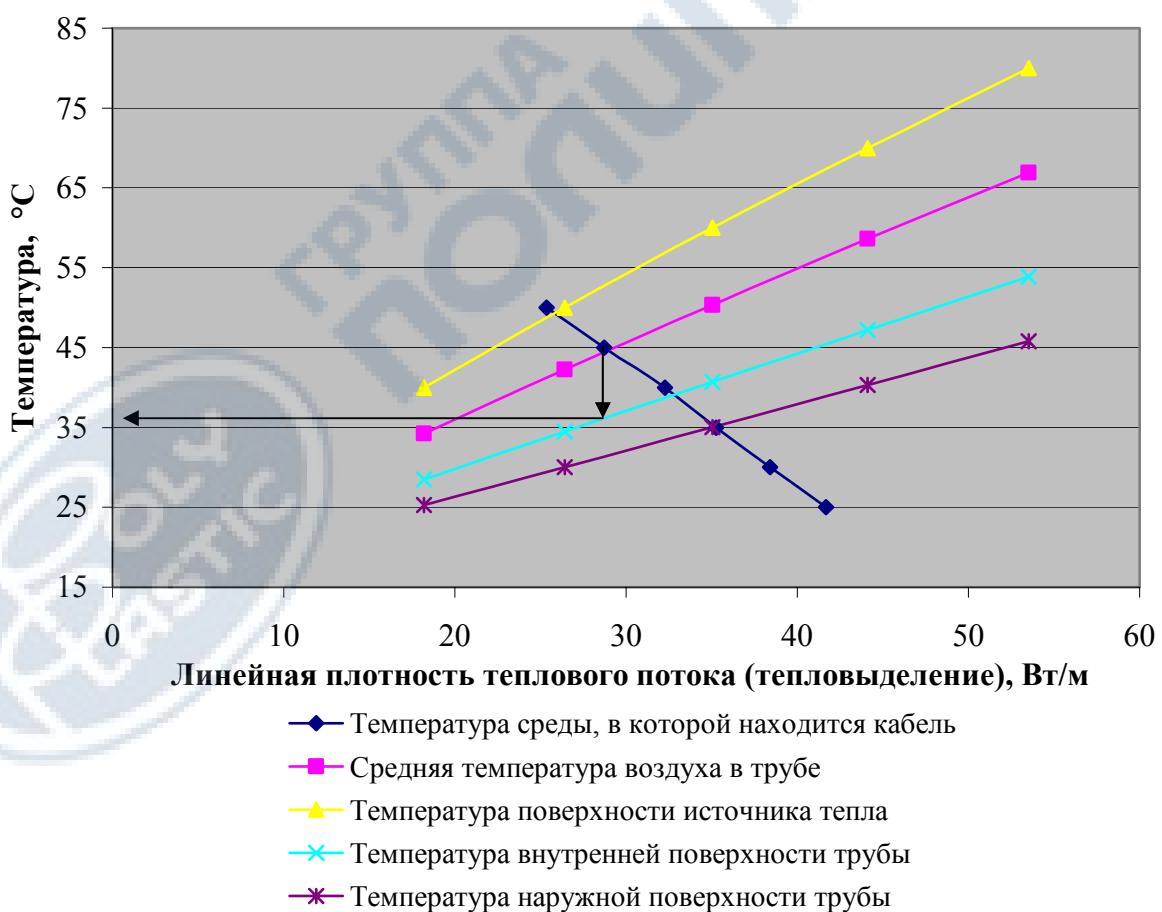
4.5 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	28,49	34,48	40,71	47,18	53,86
Температура наружной поверхности гофры, °C	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, °C	34,25	42,24	50,35	58,59	66,93

Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы 37 °C

2.4 Труба гофрированная SN8 (D=110мм); кабель АПвПу 3x50/16 10кВ

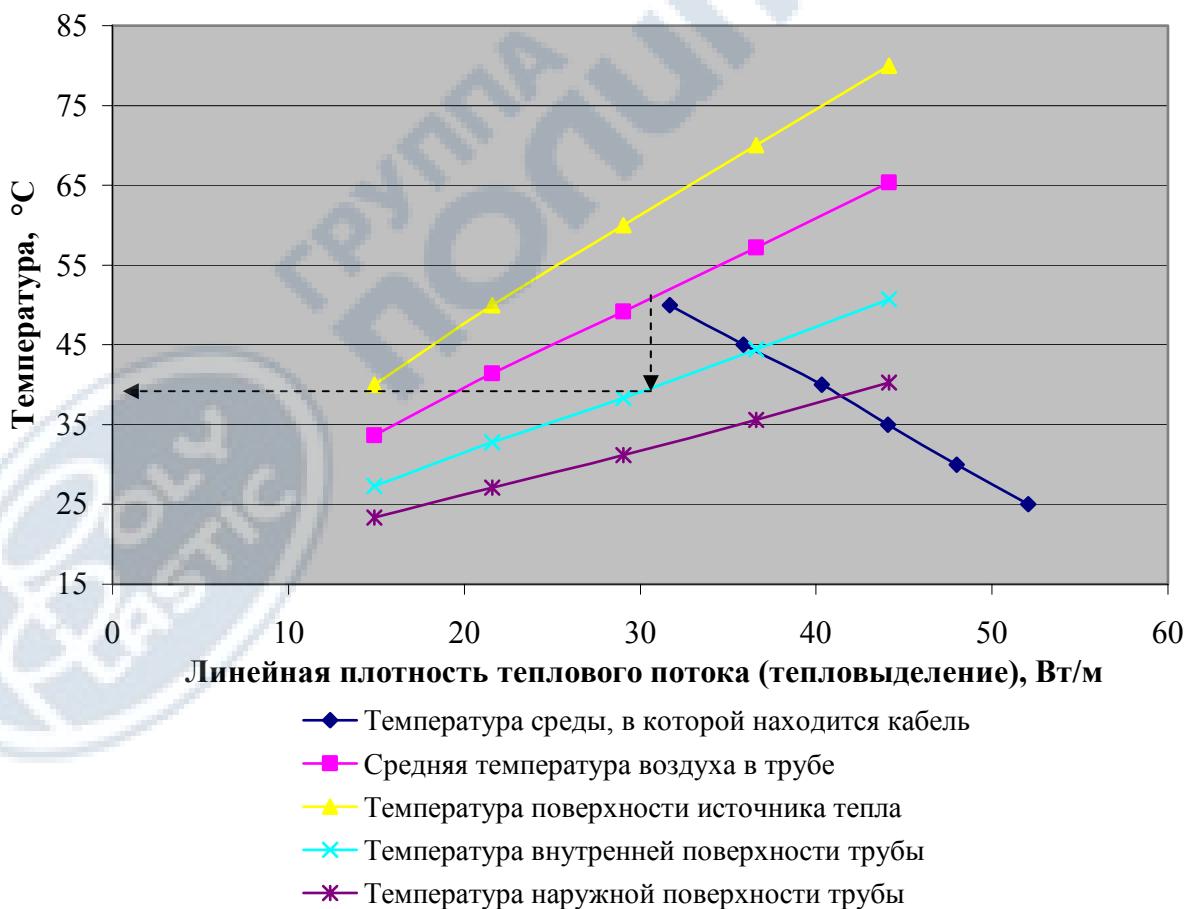
4.7 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	27,28	32,78	38,31	44,40	50,68
Температура наружной поверхности гофры, °C	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, °C	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 °C

2.5 Труба гофрированная SN8 (D=110мм); кабель АПвПу 1x50/16 35кВ

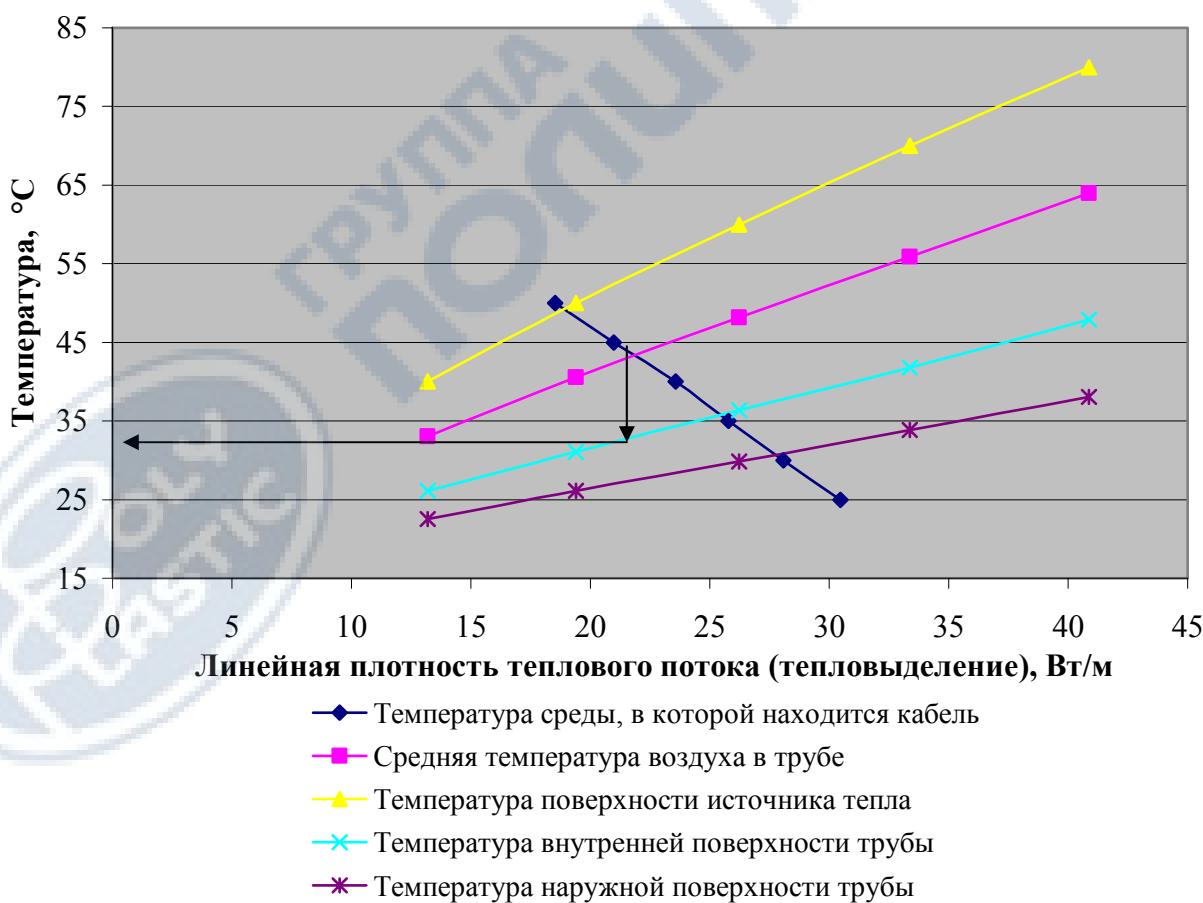
4.9 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	26,10	31,10	36,34	41,80	47,87
Температура наружной поверхности гофры, °C	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 коэффиц. 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, °C	33,05	40,6	48,17	55,9	63,94

Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы 33 °C

2.6 Труба гофрированная SN8 (D=160мм); кабель АПвПу 1x800/35 35кВ

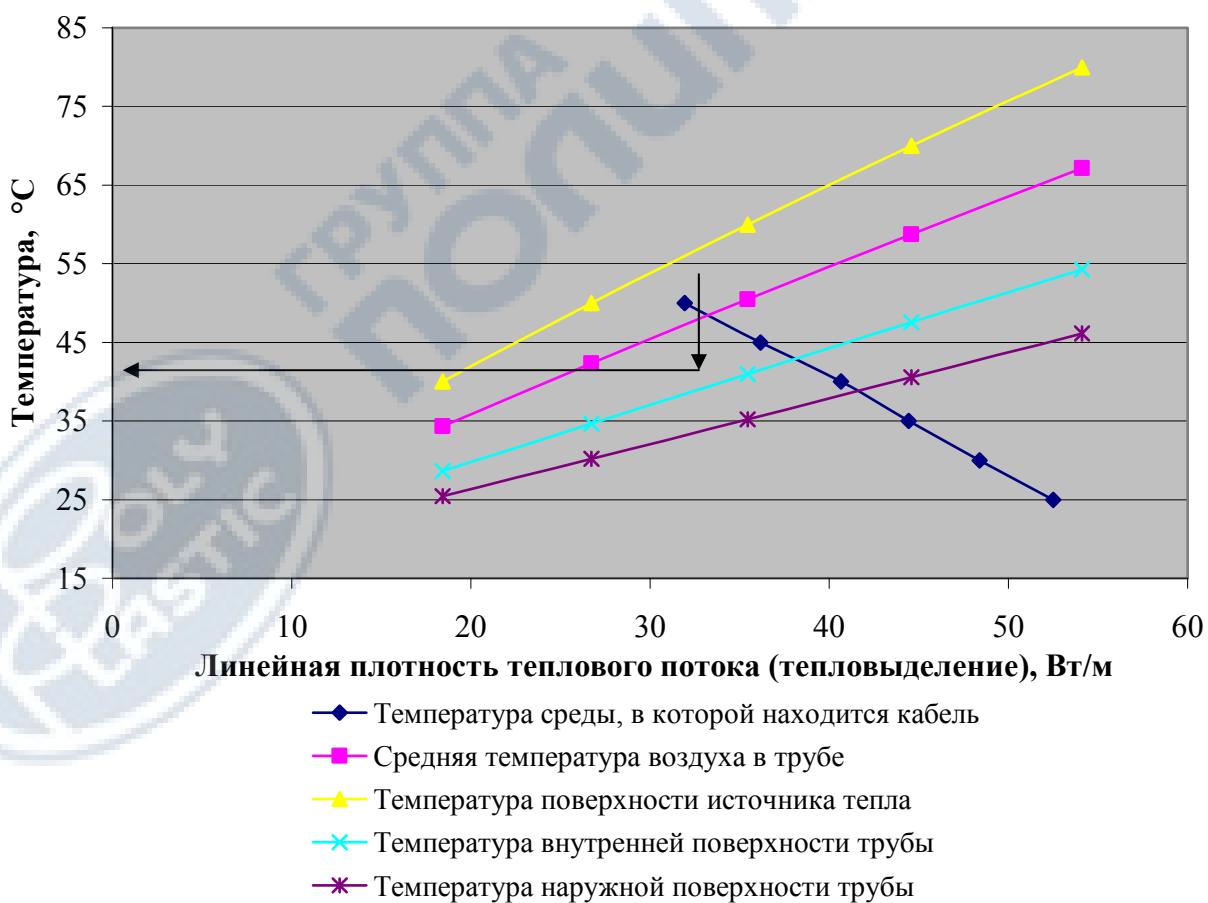
4.11 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	28,65	34,70	41,00	47,53	54,27
Температура наружной поверхности гофры, °C	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, °C	34,32	42,35	50,50	58,77	67,13

Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы 39 °C

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

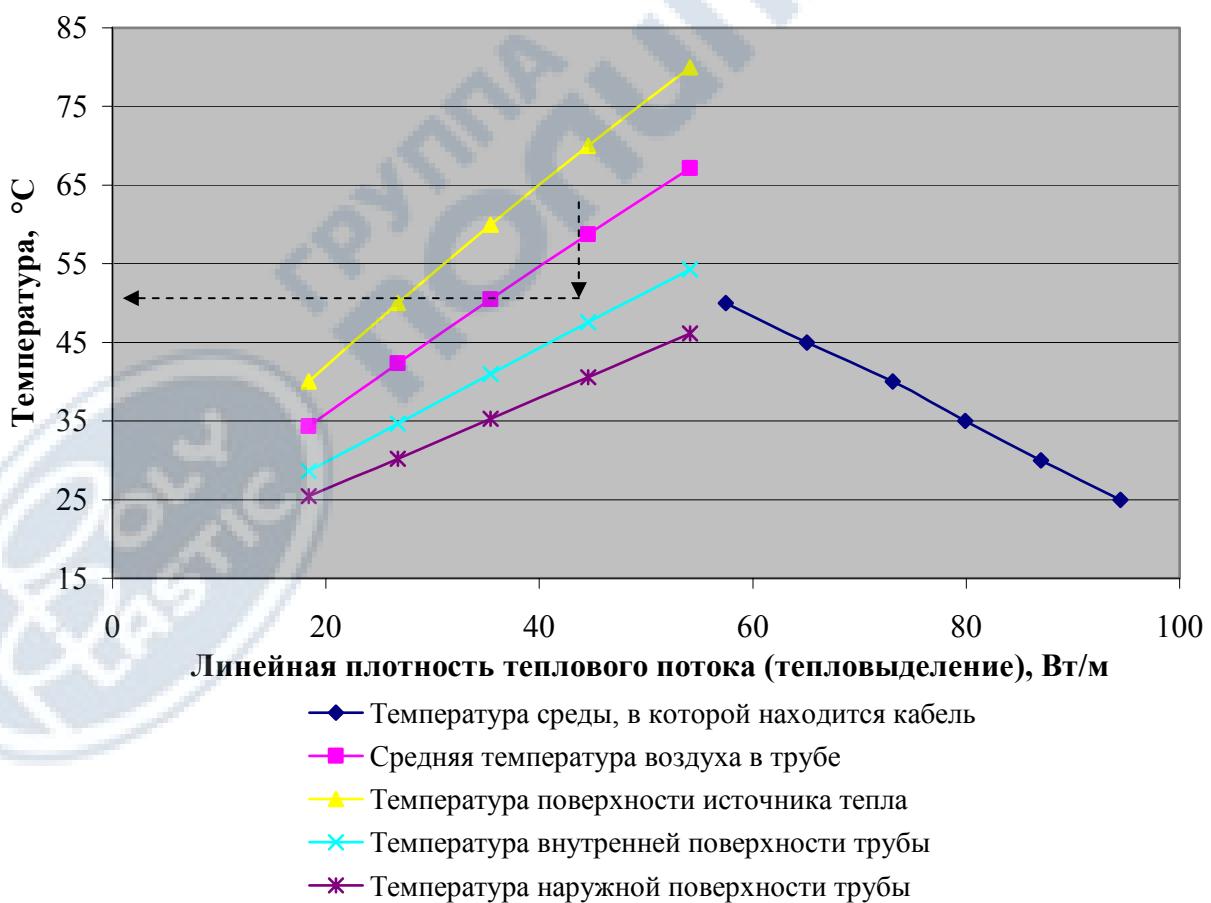
4.13 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	28,65	34,70	41,00	47,59	54,27
Температура наружной поверхности гофры, °C	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, °C	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 °C

2.8 Труба гофрированная SN8 (D=160мм); кабель АПвПу 3x240/25 – 10кВ

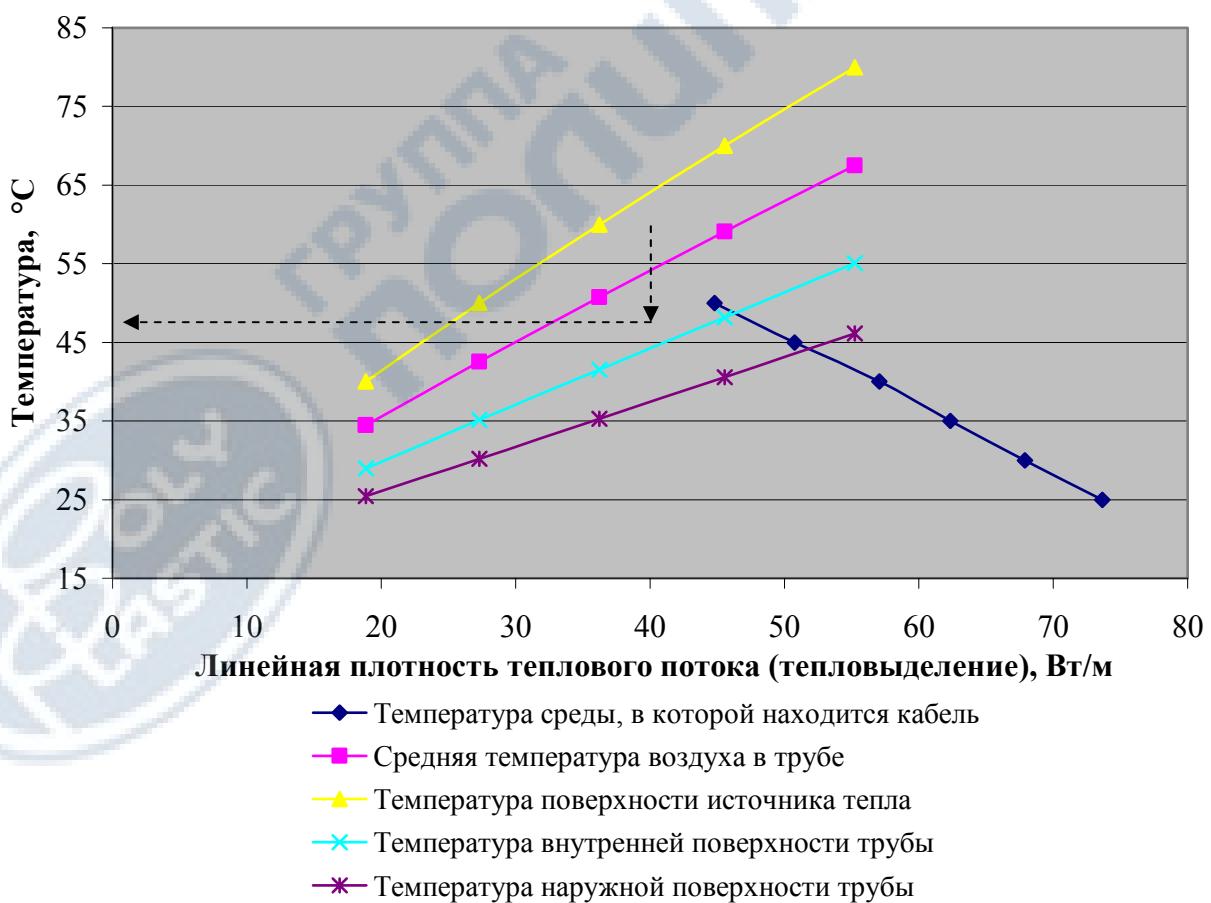
4.15 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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	0479	0,451
Суммарное термическое сопротивление трубы, м·К/Вт	1,327	1,281	1,242	1,208	1,177
Температура внутренней поверхности трубы, °C	28,96	35,13	41,55	48,20	55,06
Температура наружной поверхности гофры, °C	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, °C	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 °C

2.9 Труба гофрированная SN8 (D=200мм); кабель АПвПу 1x1000/35 – 110кВ

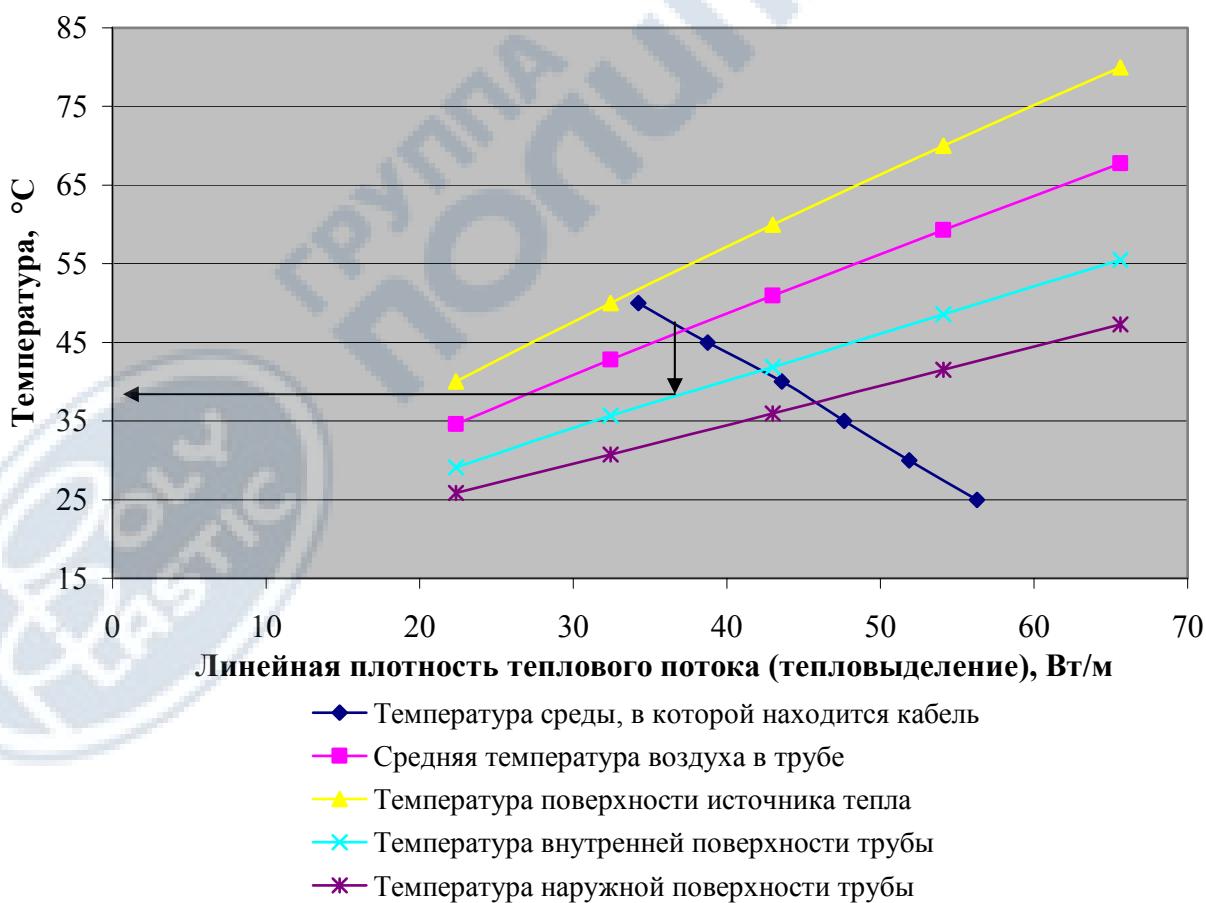
4.17 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	29,13	35,67	41,85	48,56	55,49
Температура наружной поверхности гофры, °C	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, °C	34,57	42,84	50,93	59,28	67,75

Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы 38 °C

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

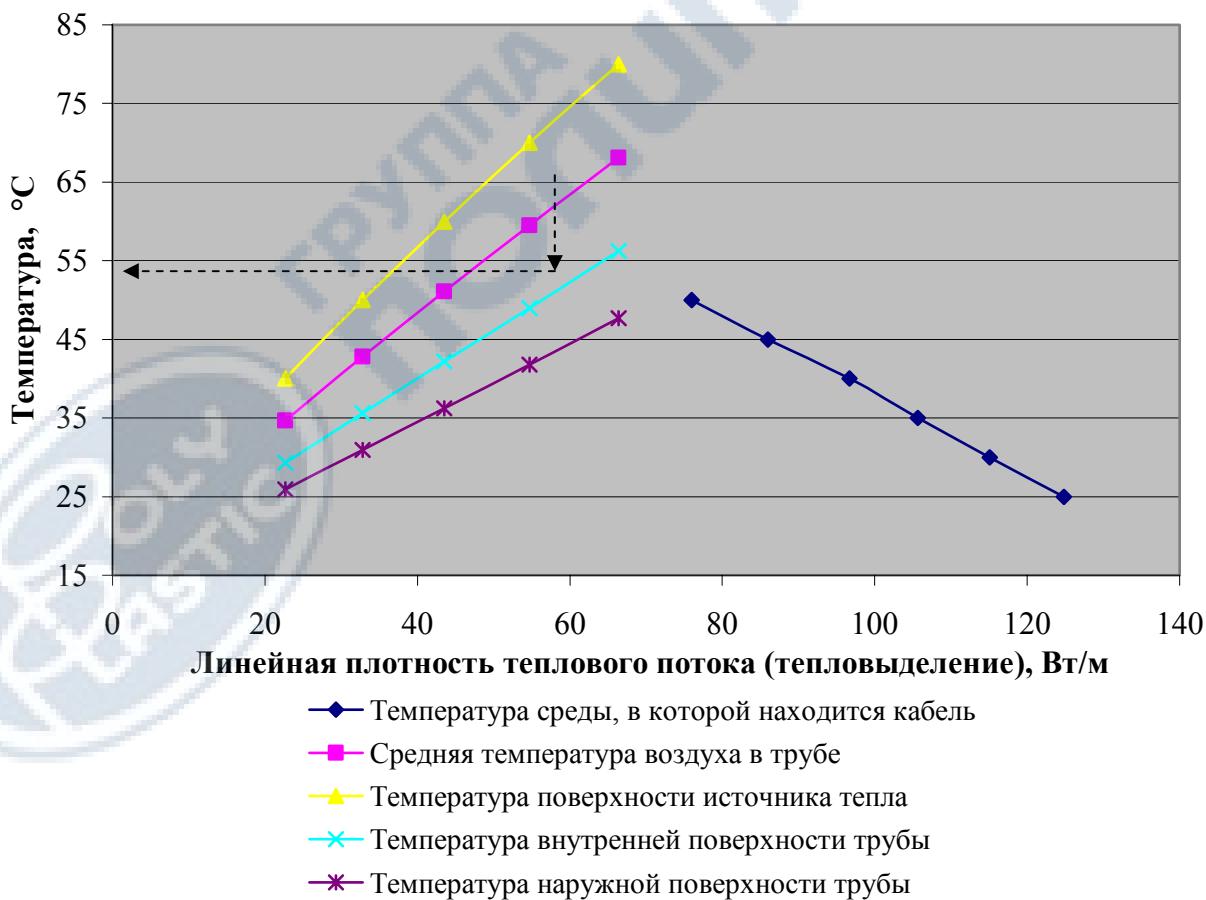
4.19 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	29,30	35,62	42,18	48,95	56,23
Температура наружной поверхности гофры, °C	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, °C	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 °C

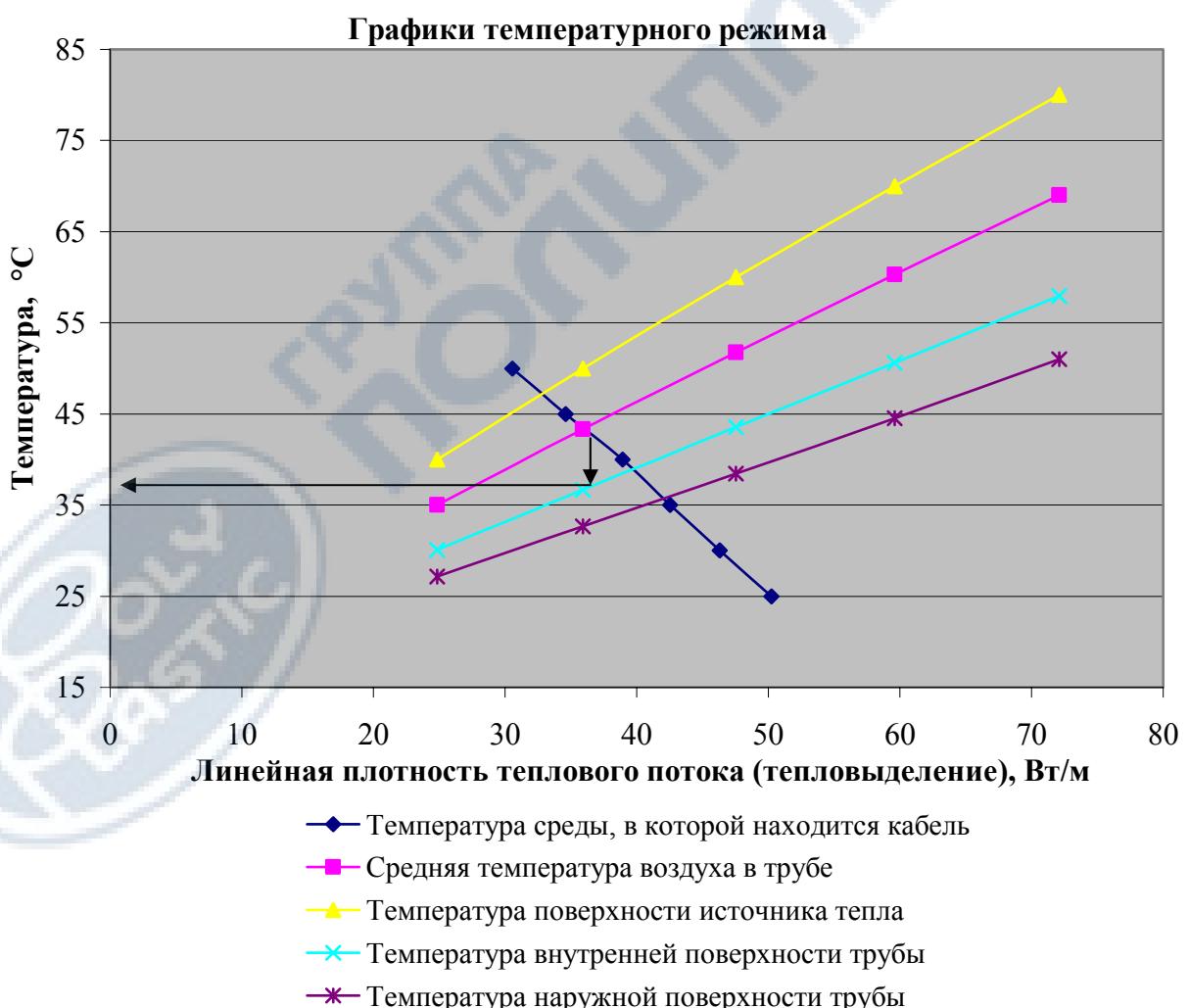
2.11 Труба гофрированная SN8 (D=250мм); кабель АПвПу 1x630/150 – 220кВ

4.21 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	30,07	36,67	43,53	50,63	57,96
Температура наружной поверхности гофры, °C	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, °C	35,03	43,34	51,77	60,31	68,98



Расчетная температура стенки трубы 37 °C

2.12 Труба гофрированная SN8 (D=250мм); кабель АПвПу 1x1000/150 – 220кВ

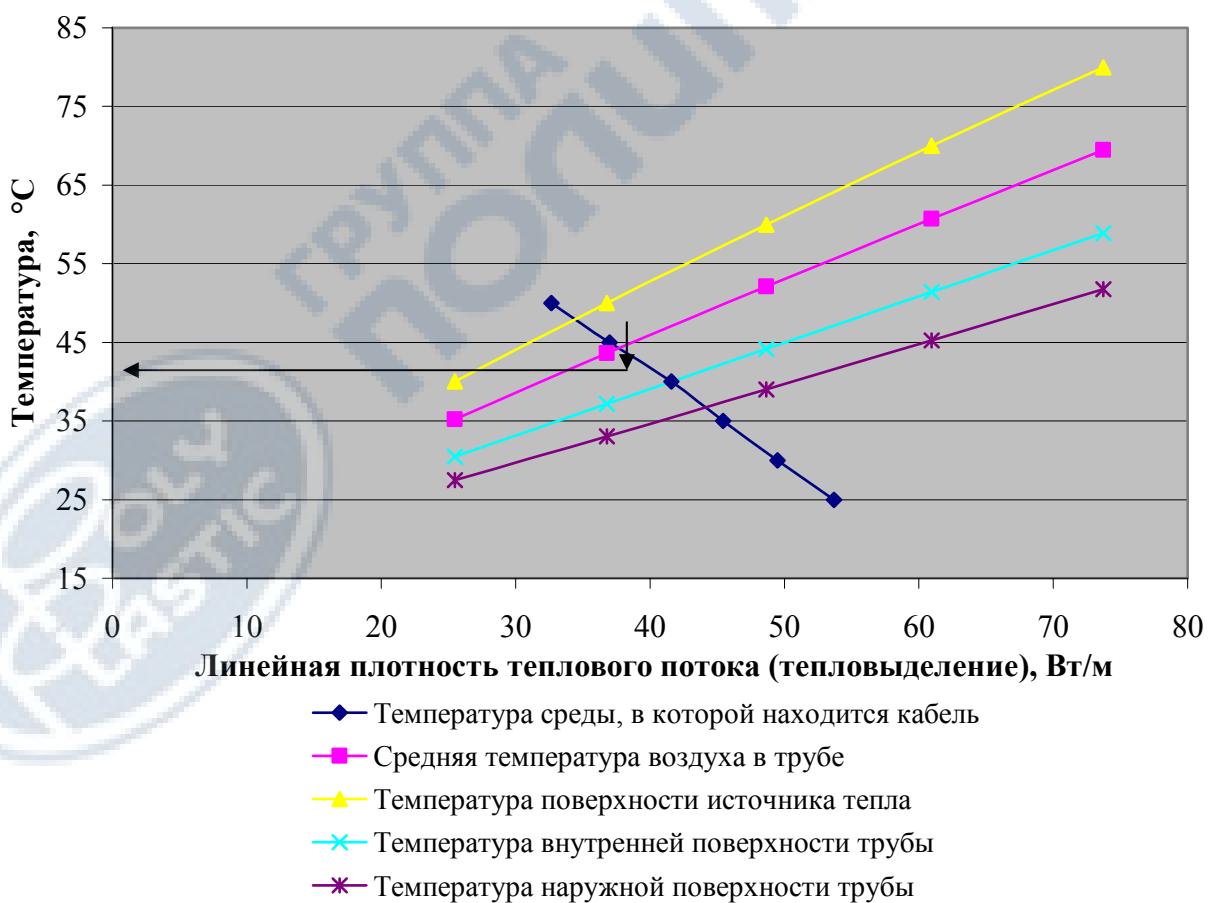
4.23 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	30,44	37,19	44,19	51,43	58,88
Температура наружной поверхности гофры, °C	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, °C	35,22	43,60	52,10	60,74	69,44

Графики температурного режима



Расчетная температура стенки трубы 38 °C

2.13 Труба гофрированная SN8 (D=125мм); кабель 3*АПвПу 1x50/16 – 35кВ

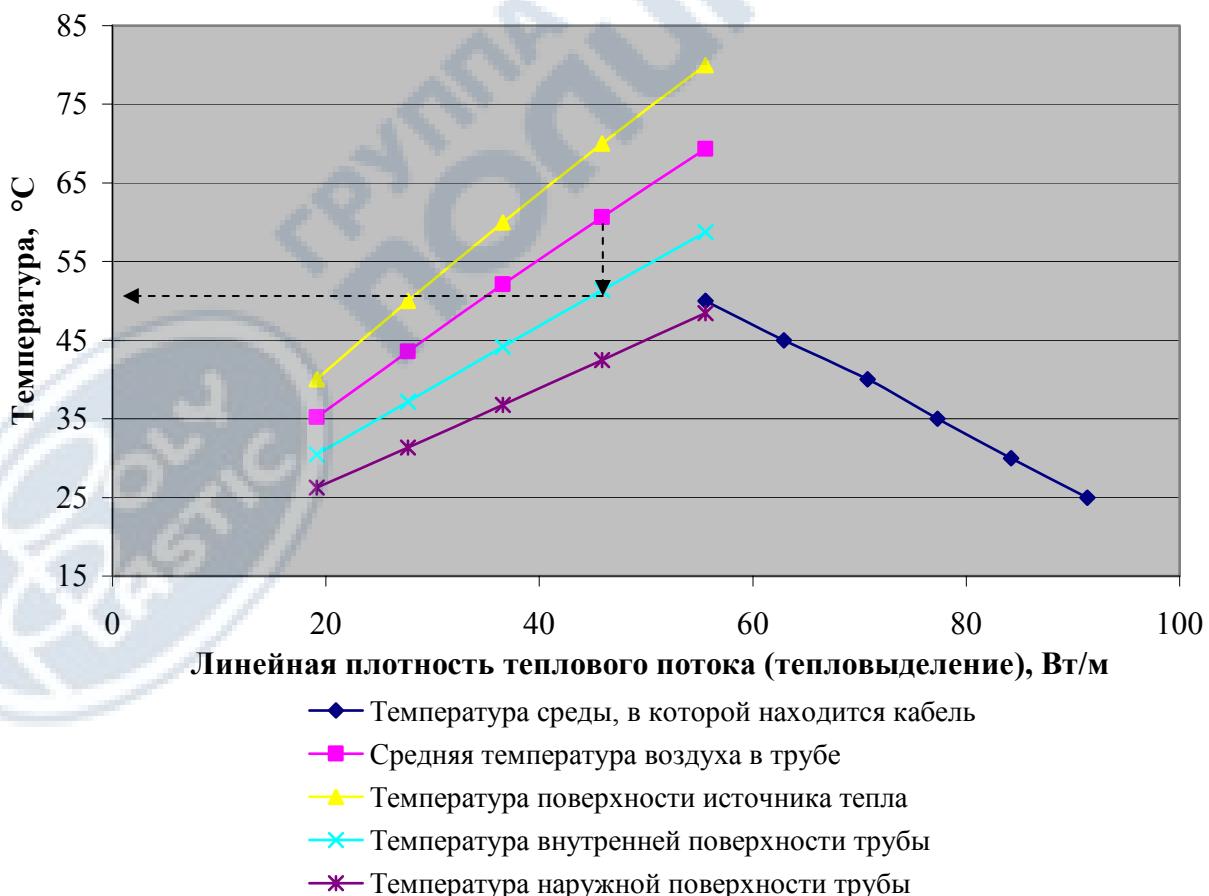
4.25 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	30,44	37,18	44,16	51,34	58,73
Температура наружной поверхности гофры, °C	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 коэф. 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, °C	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°C

2.14 Труба гофрированная SN8 (D=200мм); кабель 3*АПвПу 1x185/35 – 110кВ

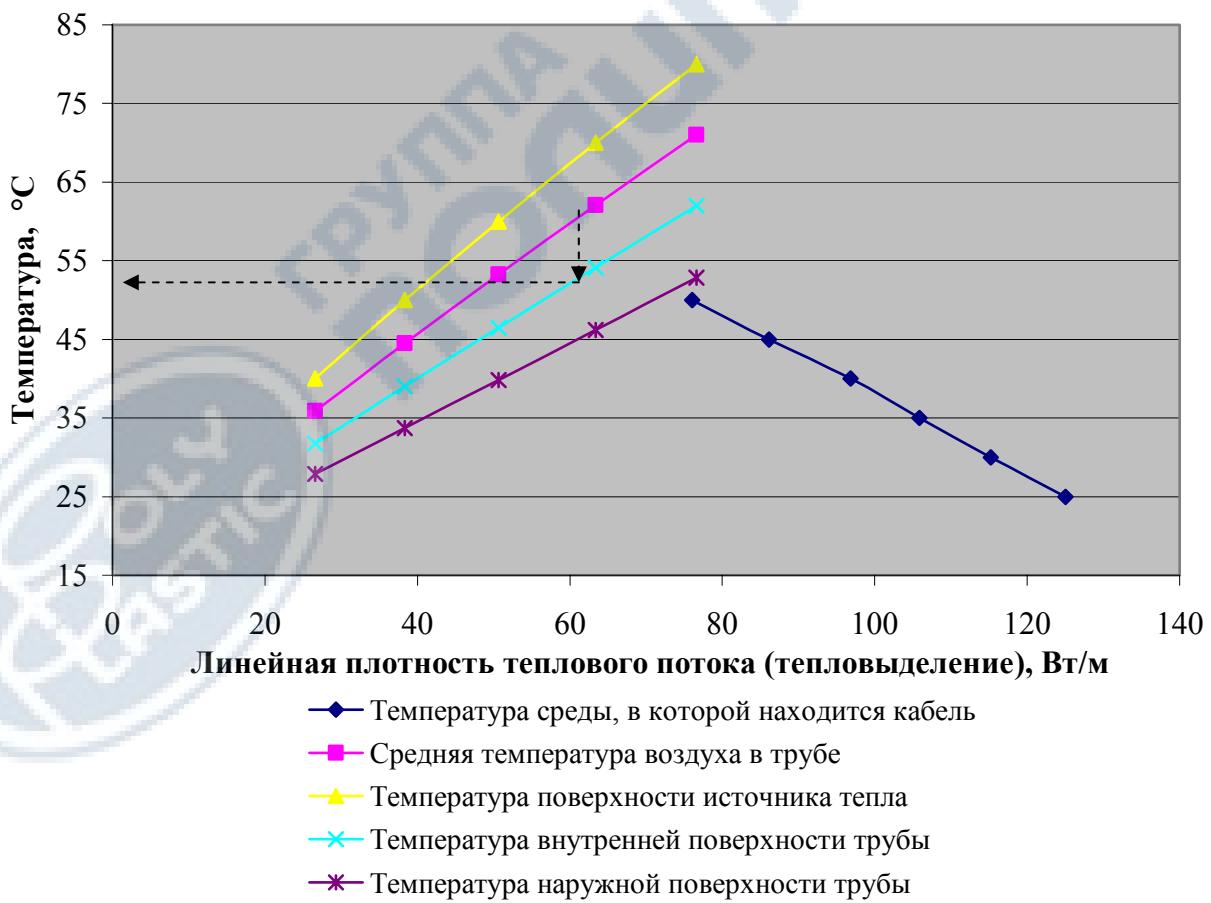
4.27 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	31,78	39,03	46,47	54,15	62,00
Температура наружной поверхности гофры, °C	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, °C	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 °C

2.15 Труба гофрированная SN8 (D=200мм); кабель 3*АПвПу 1x800/35 – 35кВ

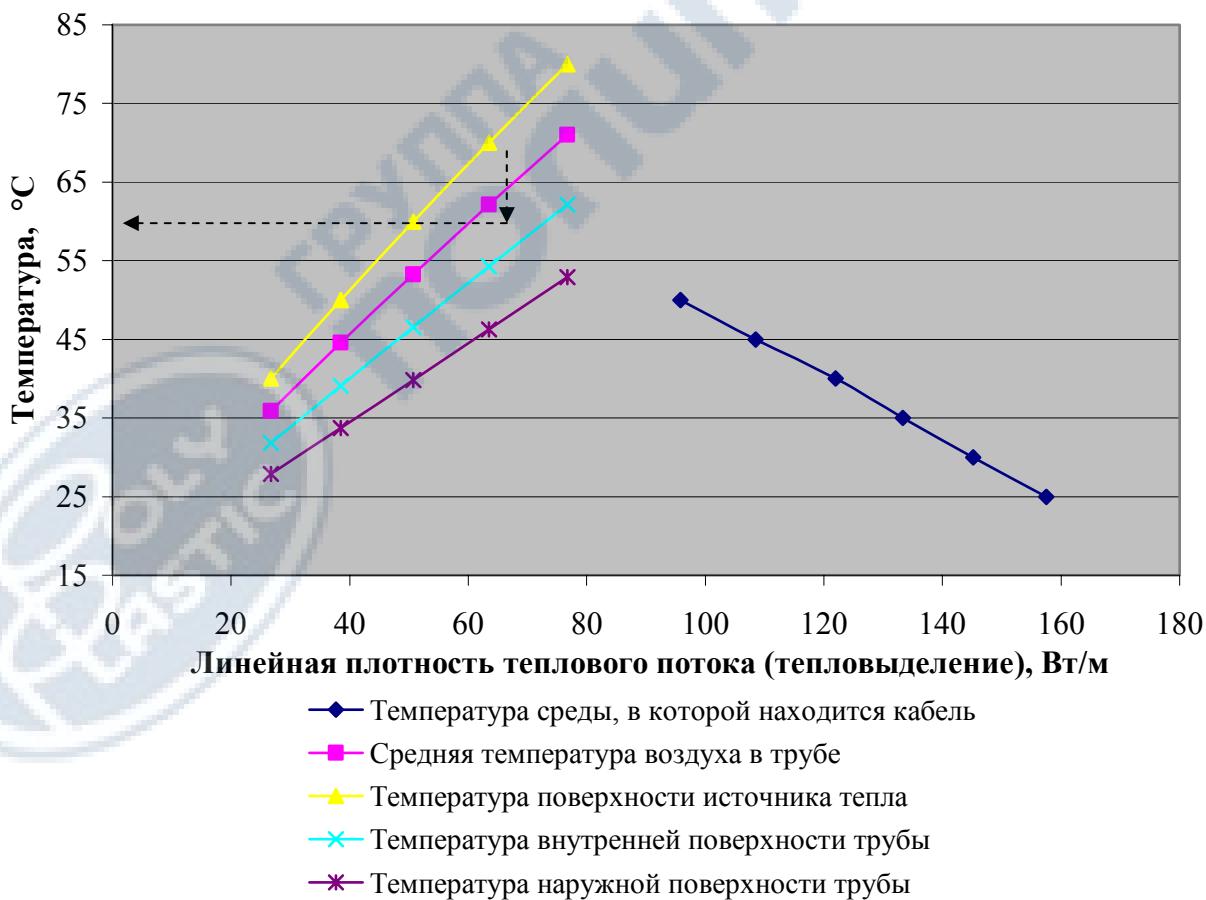
4.29 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	31,82	39,08	46,56	54,24	62,11
Температура наружной поверхности гофры, °C	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, °C	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 °C

2.16 Труба гофрированная SN8 (D=250мм); кабель 3*АПвПу 1x1000/35 – 110кВ

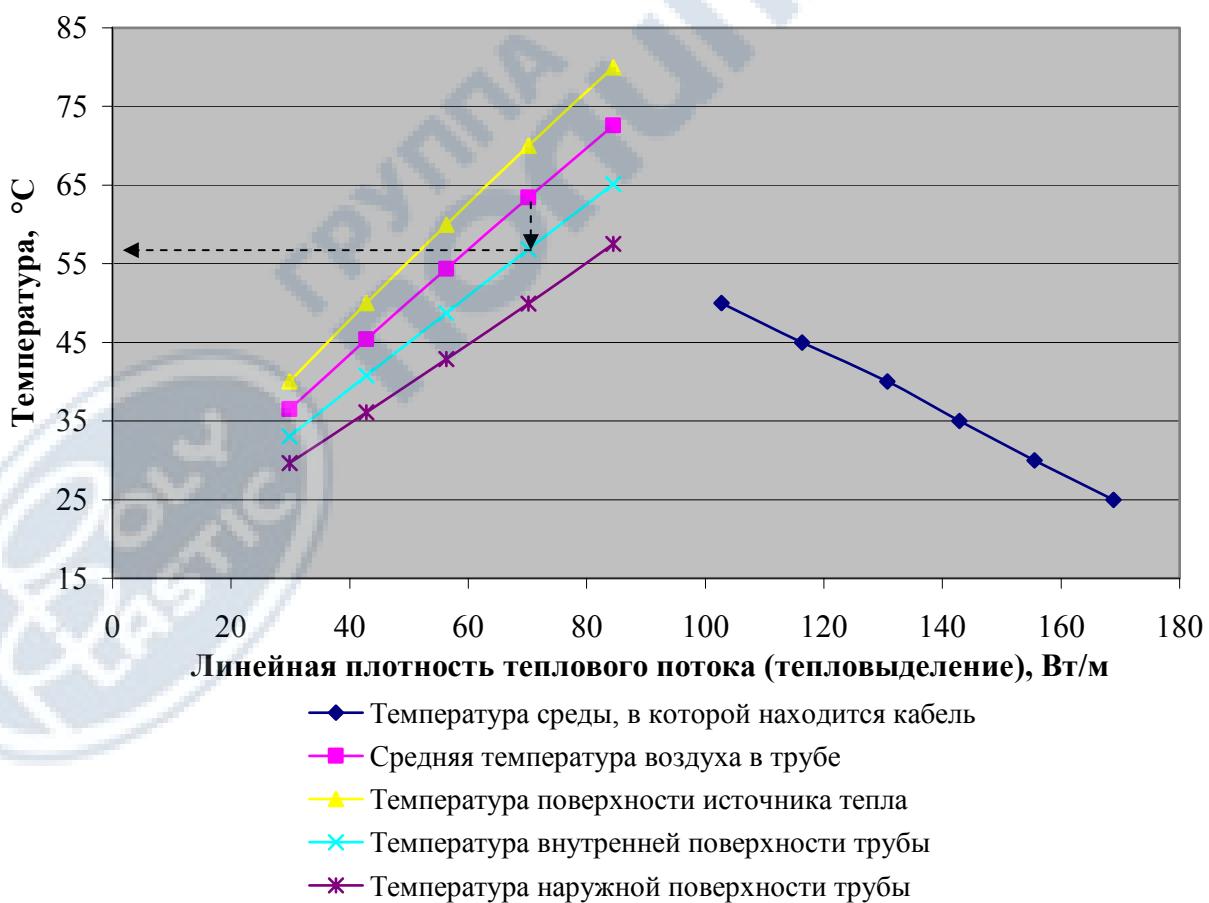
4.31 Тепловыделение кабеля

Температура окружающей среды, °C	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, °C	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, °C	33,06	40,78	48,72	56,83	65,13
Температура наружной поверхности гофры, °C	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, °C	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 °C