

Цена 20 к.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

УФИМСКИЙ НЕФТЯНОЙ ИНСТИТУТ

В. Ф. НОВОСЕЛОВ, А. А. КОРШАК,  
В. Н. ДИМИТРОВ

ТИПОВЫЕ РАСЧЕТЫ  
ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ  
ЗАЩИТЫ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ  
НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ  
И НЕФТЕБАЗ

Обложка отпечатана на Уфимском полиграфкомбинате.  
Заказ 1968, тир. 300, 1989 г.

УФА 1989

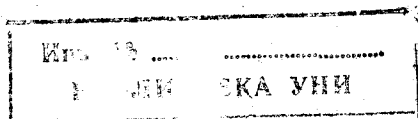
УДК 622.652.4.076

Новоселов В.Ф., Коршак А.А., Димитров В.Н. Типовые расчеты противокоррозионной защиты металлических сооружений нефтегазопроводов и нефтебаз: Учебное пособие. - Уфа: Изд. Уфим. нефт. ин-та, 1989. - 98 с.

В учебном пособии освещены основные вопросы проектирования электрохимической защиты магистральных трубопроводов и резервуаров от коррозии. В основу учебного пособия положены современные направления проектирования и повышения эффективности функционирования средств электрохимической защиты трубопроводов и резервуаров.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 0908 "Проектирование, строительство и эксплуатация газонефтепроводов, газохранилищ и нефтебаз" дневной и заочной форм обучения, а также может быть использовано инженерно-техническими работниками проектных организаций.

Табл. 19, ил. 13, библиогр. ссылок 15 назв.



С

Уфимский нефтяной институт, 1989

## 1. РАСЧЕТ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ

Расчет выполняется с целью определения типа и числа станций катодной защиты, а также характеристик анодного заземления (число электродов, марка дренажного провода и его днища).

### 1.1. Исходные данные

Исходными данными для расчета являются среднее удельное электросопротивление грунта вдоль трассы трубопровода, переходное сопротивление "трубопровод-грунт", величины сопротивления единицы для трубной стали и изоляции, геометрические размеры трубопровода и изоляции, определяющие величину входного сопротивления изолированного трубопровода.

#### 1.1.1. Удельное электросопротивление грунта

В практических условиях величина удельного электросопротивления грунта определяется с помощью четырехэлектродной установки. Методика измерений и обработки результатов изложена в [1].

Величина среднего удельного электросопротивления грунта вычисляется по формуле

$$\rho_r = \sum_{i=1}^n \rho_{ri} \frac{L_i}{L}, \quad (1)$$

где  $\rho_{ri}$  - удельное электросопротивление грунта на участке длиной  $L_i$ ;  
 $\frac{L_i}{L}$  - доля участка длиной  $L_i$  в общей протяженности трубопровода  $L$ .

Если результаты непосредственного измерения отсутствуют, то тогда определить среднее электросопротивление грунта можно только приближенно, т.к. его величина зависит не только от типа грунта, но и от его влажности, гранулометрического состава, содержания солей и т.д. Пределы изменения для различных грунтов даны в табл.1.

Таблица 1  
Величина удельного электросопротивления грунтов, Ом.м

| Вид грунта         | ! При атмосферных осадках, мм/год |          |
|--------------------|-----------------------------------|----------|
|                    | ! до 250                          | ! до 500 |
| Чернозем           | 20+50                             | 2+10     |
| Глина              | 10+100                            | 5+20     |
| Песок              | 1000                              | 30+300   |
| Известняк пористый | 1000                              | 30+300   |
| Гравий             | 1000                              | 100+1000 |

ПРИМЕР 1. Определить среднее удельное электросопротивление грунта вдоль трассы магистрального трубопровода, если известно, что на долю грунтов с  $\rho_r = 170$  Ом.м приходится 10 % трассы, с  $\rho_r = 80$  Ом.м - 10 %, с  $\rho_r = 70$  Ом.м - 20 %, с  $\rho_r = 40$  Ом.м - 10 %, с  $\rho_r = 20$  Ом.м - 20 % и с  $\rho_r = 10$  Ом.м - 30 % протяженности трубопровода.

#### РЕШЕНИЕ

По формуле (1) находим

$$\rho_r = 170 \cdot 0,1 + 80 \cdot 0,1 + 70 \cdot 0,2 + 40 \cdot 0,1 + 20 \cdot 0,2 + 10 \cdot 0,3 = 50 \text{ Ом.м.}$$

#### 1.1.2. Продольное сопротивление трубопровода

Продольное сопротивление трубопровода вычисляют по формуле

$$R_T = \frac{\rho_r}{\pi \delta (D - \delta)} \quad (2)$$

где  $\rho_r$  - удельное электросопротивление трубной стали, Ом.мм<sup>2</sup>/м;  
 $D, \delta$  - наружный диаметр трубопровода и толщина стенки.

Величина  $\rho_r$  сталей, применяемых в настоящее время в практике трубопроводного строительства, приведена в табл. 2.

Таблица 2

| Марка трубной стали | $\rho_r$ , Ом.мм <sup>2</sup> /м |
|---------------------|----------------------------------|
| 17Г2                | 0,247                            |
| 17Г20Ф              | 0,245                            |
| 08Г20Ф              | 0,243                            |
| 18Г2                | 0,218                            |

Продолжение табл. 2

| 1        | 2     |
|----------|-------|
| 18Г2САФ  | 0,266 |
| 18ХГ2САФ | 0,260 |
| 3        | 0,218 |

Если марка стали неизвестна, то величину  $\rho_r$  следует принимать равной 0,245 Ом.мм<sup>2</sup>/м [6].

ПРИМЕР 2. В результате технологического расчета установлено, что для обеспечения перекачки 46 млн.т/год нефти наиболее экономически целесообразным является диаметр трубопровода  $D = 1020$  мм с толщиной стенки  $\delta = 10$  мм, изготовленной из стали 17Г2.

#### РЕШЕНИЕ

Удельное электросопротивление стали 17Г2 составляет 0,247 Ом.мм<sup>2</sup>/м. Подставляя исходные данные в формулу (2), получим

$$R_T = \frac{0,247}{3,14 \cdot 10 \cdot (1020 - 10)} = 7,79 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м.}$$

#### 1.1.3. Переходное сопротивление "Трубопровод-грунт"

Величина переходного сопротивления "трубопровод-грунт"  $R_n$  характеризует качество изоляционного покрытия. На практике её определяют методом катодной поляризации участка трубопровода [6]. При этом величину  $R_n$  вычисляют по формуле

$$R_n = \frac{\pi D R_T X^2}{(\ln U_1 / U_2)^2} \quad (3)$$

где  $X$  - расстояние между сечениями трубопровода, в которых измерены величины потенциала  $U_1$  и  $U_2$ .

Опыт показывает, что с течением времени качество изоляционного покрытия трубопроводов ухудшается. Причем изменение величины переходного сопротивления происходит по экспоненциальному закону

$$R_n(\tau) = R_{nn} \cdot e^{-\beta \tau} \quad (4)$$

где  $R_{nn}, R_n(\tau)$  - величины переходного сопротивления в начале эксплуатации и на момент времени  $\tau$ ;

$\beta$  - показатель скорости старения, 1/год.

Величина коэффициента  $\beta$  колеблется в пределах от 0,118 до 0,133 1/год [13]. Для ориентировочных расчетов можно принять  $\beta = 0,125$  1/год, а  $R_{пн} = 10^4$  Ом.м<sup>2</sup> - для изоляционных покрытий из полимерных липких лент.

Методом катодной поляризации можно определить величины переходного сопротивления  $R_n(\tau_1)$  и  $R_n(\tau_2)$  на моменты времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . Тогда фактическая величина показателя скорости старения для данного трубопровода составит

$$\beta = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \cdot \ln \frac{R_n(\tau_1)}{R_n(\tau_2)}. \quad (5)$$

Интегрируя уравнение (4), получим формулу для расчета среднего переходного сопротивления за нормативный срок службы  $\tau_{нс}$  установок катодной защиты:

$$R_{п.ср} = \frac{R_{пн}}{\beta \tau_{нс}} (1 - e^{-\beta \tau_{нс}}). \quad (6)$$

Срок службы установок определяется по формуле

$$\tau_{нс} = \frac{1}{\xi_{ам}}, \quad (7)$$

где  $\xi_{ам}$  - норматив амортизационных отчислений по установкам катодной защиты (согласно [6]  $\xi_{ам} = 0,148$  1/год).

В случае, когда срок ввода станций катодной защиты в эксплуатацию не совпадает с окончанием строительства линейной части трубопровода, для описания изменения величины переходного сопротивления во времени используют зависимость

$$R_n(\tau) = R_{пк} \left( \frac{R_{пн}}{R_{пк}} \right)^{\frac{\tau}{\tau_c + \tau}}, \quad (8)$$

где  $R_{пк}$  - конечное переходное сопротивление "трубопровод - грунт", определяемое из трансцендентного уравнения

$$R_{пк} - \frac{p_r}{2\pi} \ln R_{пк} = \frac{p_r}{\pi} \ln \frac{1,12}{\sqrt{r_r D H}}, \quad (9)$$

где  $H$  - глубина заложения оси трубопровода;

$\tau_c$  - постоянная времени старения изоляционного покрытия.

Ориентировочные значения постоянной времени старения для различных грунтов и конструкций изоляционного покрытия приведены в табл.3.

Таблица 3

Ориентировочная величина  $\tau_c$  [13], год

| Конструкция изоляционного покрытия | Пределы изменения постоянной времени старения для грунтов |                       |                        |
|------------------------------------|---|-----------------------|------------------------|
|                                    | солончака   | песочно-глинистых     |                        |
|                                    | $\rho_r = 1+10$ Ом.м                                      | $\rho_r = 10+20$ Ом.м | $\rho_r = 20+200$ Ом.м |
| <b>Битумное:</b>                   |   |                       |                        |
| нормальное ( $\delta_{из}=4$ мм)   | 4-8   | 8-16                  | 16-30                  |
| усиленное ( $\delta_{из}=6$ мм)    | 8-16  | 12-20                 | 20-40                  |
| <b>Полимерное пленочное:</b>       |   |                       |                        |
| однослойное                        | 6-12  | 12-25                 | 25-45                  |
| двухслойное                        | 10-20   | 20-40                 | 40-50                  |

При наличии экспериментально определенных значений  $R_n(\tau_1)$  и  $R_n(\tau_2)$  постоянную времени старения изоляционного покрытия данного трубопровода можно определить по формулам

$$\tau_c = \tau \frac{\ln \frac{R_n(\tau)}{R_{пк}}}{\ln \frac{R_{пн}}{R_n(\tau)}} \quad (8')$$

$$\text{или} \quad \tau_c = \frac{\tau_2 \ln \frac{R_n(\tau_2)}{R_{пк}} - \tau_1 \ln \frac{R_n(\tau_1)}{R_{пк}}}{\ln \frac{R_n(\tau_1)}{R_n(\tau_2)}}. \quad (9')$$

Формулой (8') необходимо пользоваться, когда величина начального переходного сопротивления известна, а формулой (9'), когда величина  $R_{пн}$  неизвестна.

#### ПРИМЕР 3.

Вычислить величины переходного сопротивления "трубопровод-грунт" к концу нормативного срока службы изоляционного покрытия на основе полимерных липких лент и в среднем за этот срок, если в конце второго и пятого годов эксплуатации покрытия измеренные величины переходного сопротивления составили

соответственно 15576

и 10705 Ом·м<sup>2</sup>.

## РЕШЕНИЕ

1. По формуле (5) вычисляем величину показателя скорости старения покрытия

$$\beta = \frac{1}{5-2} \cdot \ln \frac{15576}{10705} = 0,125 \text{ 1/год.}$$

2. Продолжительность нормативного срока службы изоляции по формуле (7)

$$\tau_{нс} = \frac{1}{0,105} = 9,5 \text{ лет.}$$

3. Величина переходного сопротивления - в начале эксплуатации из формулы (4)

$$R_{пн} = 15576 \cdot e^{0,125 \cdot 2} = 20000 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2;$$

- в конце нормативного срока службы по формуле (4)

$$R_{п}(\tau_{нс}) = 20000 \cdot e^{-0,125 \cdot 9,5} = 6099,7 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2;$$

- в среднем за нормативный срок службы по формуле (6)

$$R_{п.ср} = \frac{20000}{0,125 \cdot 9,5} \cdot (1 - e^{-0,125 \cdot 9,5}) = 11705,6 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2.$$

1.1.4. Входное сопротивление изолированного трубопровода

Величина входного сопротивления  $Z$  используется при расчете зоны действия станций катодной защиты (СКЗ), силы дренажного тока. В свою очередь она находится в зависимости от продольного сопротивления трубопровода  $R_T$  и сопротивления единицы длины изоляции  $R_{из}$ :

$$R_{из} = \frac{R_{п}}{\pi D}. \quad (10)$$

Среднее значение входного сопротивления трубопровода за нормативный срок эксплуатации катодной установки составляет

$$Z_{ср} = 0,5 \cdot \sqrt{R_T \cdot R_{из.ср}}, \quad (11)$$

а величина входного сопротивления к концу нормативного срока

$$Z_K = 0,5 \cdot \sqrt{R_T \cdot R_{из}(\tau_{нс})}, \quad (12)$$

где  $R_{из.ср}$ ,  $R_{из}(\tau_{нс})$  - сопротивления изоляционного покрытия, рассчитанные по формуле (10) по величинам переходного сопротивления соответственно среднего на момент времени  $\tau_{нс}$ .

1.1.5. Постоянная распределения потенциалов и токов вдоль защищаемого трубопровода

Величина постоянной распределения  $\alpha$  характеризует интенсивность изменения наложенной разности потенциалов и токов по длине защищаемого трубопровода. Она зависит от соотношения сопротивлений изоляции и металла труб и вычисляется по формуле

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_T}{R_{из}(\tau_{нс})}}, \quad (13)$$

т.е. для наихудшего случая.

## ПРИМЕР 4

Определить величину входного сопротивления изолированного трубопровода диаметром  $D=1020$  мм к концу и в среднем за нормативный срок службы, если продольное сопротивление трубопровода составляет  $R_T = 7,7 \cdot 10^{-6}$  Ом·м. Вычислить постоянную распределения токов и потенциалов вдоль защищаемого трубопровода. Недостающие данные взять из примера 3.

## РЕШЕНИЕ

1. Находим сопротивление единицы длины изоляции среднее  $R_{из.ср}$  и к концу нормативного срока службы  $R_{из}(\tau_{нс})$  по формуле (10):

$$R_{из.ср} = \frac{11705,6}{3,14 \cdot 1,02} = 3652,9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$R_{из}(\tau_{нс}) = \frac{6099,7}{3,14 \cdot 1,02} = 1903,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

2. Соответствующие величины входного сопротивления по формулам (11), (12)

$$Z_{ср} = 0,5 \cdot \sqrt{7,7 \cdot 10^{-6} \cdot 3652,9} = 8,4 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$$

$$Z_K = 0,5 \cdot \sqrt{7,7 \cdot 10^{-6} \cdot 1903,5} = 6,1 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}.$$

3. Постоянная распределения токов и потенциалов по форму-

ле (13)

$$\alpha = \sqrt{\frac{2,2 \cdot 10^{-6}}{1903,5}} = 63,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/м.}$$

## I.1.6. Расчетные значения потенциалов

При расчете катодной защиты подземных металлических сооружений различают три значения потенциала:

- 1) естественный или стационарный потенциал  $E_{\text{ест}}$ , то есть существующий до включения защиты;
- 2) наложенный или расчетный потенциал  $E_{\text{min(max)}}$ , дополнительно накладываемый на сооружение в результате действия защиты;
- 3) защитный или общий потенциал  $E_{\text{защ.min(max)}}$  сооружения, то есть установившийся после подключения защиты.

По определению вышеназванные потенциалы связаны между собой выражением

$$E_{\text{min(max)}} = E_{\text{защ.min(max)}} - E_{\text{ест}}. \quad (14)$$

Величины потенциалов при защите подземных металлических сооружений от коррозии измеряют по отношению к медно-сульфатному электроду сравнения (МСЭ).

Многочисленными измерениями установлено, что величина естественного потенциала подземных металлических сооружений колеблется в интервале от  $-0,23$  до  $-0,72\text{В}$ , причем практический диапазон изменения  $E_{\text{ест}}$  составляет от  $-0,45$  до  $-0,60\text{В}$ . Поэтому, если не имеется точных данных о величине естественного потенциала стали в данном грунте, принято считать  $E_{\text{ест}} = -0,55\text{В}$  (по МСЭ).

Нормативными документами [1] установлены следующие предельные значения защитного потенциала.

Таблица 4

Минимальные защитные потенциалы, В

| Металл со-<br>оружения | Защитное<br>покрытие   | Электроды сравнения |                 | Среда              |
|------------------------|------------------------|---------------------|-----------------|--------------------|
|                        |                        | водородный          | медносульфатный |                    |
| Сталь                  | Есть                   | -0,8                | -1,1            | Любая<br>"-"       |
|                        | Нет                    | Не ограничивается   |                 |                    |
| Свинец                 | Есть                   | -0,8                | -1,1            | Кислая<br>Щелочная |
|                        | Нет                    | -1,0                | -1,3            |                    |
| Алюминий               | Частично<br>повреждено | -1,08               | -1,38           | Любая              |

Отсюда, пользуясь формулой (14), легко получить предельные значения наложенного потенциала. Например, для стального изолированного трубопровода

$$E_{\text{max}} = -1,1 - (-0,55) = -0,55 \text{ В}$$

$$E_{\text{min}} = -0,85 - (-0,55) = -0,30 \text{ В.}$$

В дальнейших расчетах знак "минус" перед величиной потенциала будем опускать, но он подразумевается.

## I.2. Расчетные зависимости для распределения наложенной разности потенциалов и тока защиты вдоль трубопровода

## I.2.1. Общие сведения

Независимо от количества подключенных к трубопроводу СКЗ и его протяженности уравнения, описывающие закономерности изменения токов и потенциалов по длине трубопровода, имеют следующий вид [6]:

$$I(x) = C_1 e^{\alpha x} + C_2 e^{-\alpha x} - \frac{I_{\text{max}} \rho_r}{\pi R_{\text{из}}} \operatorname{Arsh} \frac{x}{y} \quad (15)$$

$$E(x) = C_3 e^{\alpha x} + C_4 e^{-\alpha x} + \frac{I_{\text{max}} \rho_r}{\pi \sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (16)$$

где  $C_1 + C_4$  - постоянные интегрирования, определяемые из соответствующих граничных условий;

$x$  - удаление рассматриваемого сечения трубопровода от точки дренажа (место подключения СКЗ);

$I_{\text{max}}$  - сила тока в точке дренажа;

$y$  - удаление анодного заземления от трубопровода.

Уравнения (15), (16) получены при следующих допущениях:

- 1) грунт является однородным;
- 2) трубопровод выполнен из труб одного и того же диаметра с одинаковой толщиной стенки;
- 3) материал изоляции обладает неизменными по длине диэлектрическими свойствами, а сама она - без дефектов, одинаковой толщины.

Частным случаем уравнений (15), (16) являются зависимости для  $I(x)$ ,  $E(x)$ , получаемые при катодной защите трубопроводов конечной и "бесконечной" длины одной или нескольких СКЗ.

### 1.2.2. Станция катодной защиты "бесконечной" длины

Для станций катодной защиты "бесконечной" длины, когда к трубопроводу подключена одна СКЗ, при  $X \rightarrow \infty$  величина наложенного потенциала стремится к нулю, т.е.  $E(x) \rightarrow 0$ . Определенные для этих условий постоянные интегрирования равны

$$C_1 = C_3 = 0; C_2 = I_{\max}; C_4 = E_{\max} - \frac{I_{\max} \rho_r}{\pi y}. \quad (17)$$

С учетом (17) формулы (15), (16) принимают вид

$$I(x) = I_{\max} \left( e^{-\alpha x} - \frac{\rho_r}{\pi R_{из}} \cdot \text{Arsh} \frac{x}{y} \right);$$

$$E(x) = \frac{E_{\max}}{1 + \theta} \left( e^{-\alpha x} + \frac{y \theta}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right), \quad (18)$$

где  $I_{\max} = \frac{E_{\max}}{2z + \frac{\rho_r}{\pi y}}; \theta = \frac{\rho_r}{2\pi z y}. \quad (19)$

#### ПРИМЕР 5

К изолированному стальному трубопроводу подключена станция катодной защиты. Определить, какой должна быть наложенная разность потенциалов в точке дренажа, чтобы обеспечить длину плеча защиты  $X = 10$  км. Удаление анодного заземления от трубопровода составляет  $y = 500$  м. Остальные исходные данные взять из примеров I и 4.

#### РЕШЕНИЕ

I. Защита трубопровода от коррозии обеспечивается при величине наложенной разности потенциалов  $E(x) = E_{\min} = -0,3$  В. Решая уравнение (18) относительно  $E_{\max}$ , получим

$$E_{\max} = \frac{E_{\min} (1 + \theta_k)}{e^{-\alpha x} + \frac{y \theta_k}{\sqrt{x^2 + y^2}}} = \frac{-0,3 \cdot (1 + 0,261)}{e^{-636 \cdot 10^{-6} \cdot 10000} + \frac{500 \cdot 0,261}{\sqrt{10000^2 + 500^2}}} = 0,78,$$

где  $\theta_k = \frac{\rho_r}{2\pi z y} = \frac{50}{2 \cdot 3,14 \cdot 6,1 \cdot 10^{-2} \cdot 500} = 0,261.$

### 1.2.3. Катодная защита коротких трубопроводов

В данном случае под короткими понимаются трубопроводы, на концах которых при подключении СКЗ, создающей в точке дренажа потенциал  $E_{заш. \max}$ , устанавливается величина защитного потенциала не ниже минимального, т.е.  $E(x) \geq E_{заш. \min}$ .

Для определения постоянных интегрирования используют следующие системы уравнений:

$$\begin{cases} E_{др} = C_3 + C_4 + \frac{I_{\max} \rho_r}{\pi y}; \\ E_{\min} = C_3 e^{\alpha x_m} + C_4 e^{-\alpha x_m} + \frac{I_{\max} \rho_r}{\pi \sqrt{x_m^2 + y^2}} \end{cases} \quad (20)$$

и  $\begin{cases} I_{\max} = C_1 + C_2; \\ E_{\min} = R_{из} (C_2 e^{-\alpha x_m} - C_1 e^{\alpha x_m} + \frac{I_{\max} \rho_r}{\pi R_{из} \sqrt{x_m^2 + y^2}}) \end{cases} \quad (21)$

где  $x_m$  - половина длины трубопровода.

Решая (20), (21) относительно  $C_1 \div C_4$  и подставляя полученные выражения в (15), (16), получим

$$I(x) = I_{\max} \left\{ \frac{\text{ch}[\alpha(x_m - x)]}{\text{ch}(\alpha x_m)} + \frac{\rho_r \text{Sh}(\alpha x)}{2\pi z \sqrt{x_m^2 + y^2} \text{ch}(\alpha x_m)} - \frac{\rho_r}{\pi R_{из}} \text{Arsh} \frac{x}{y} \right\}; \quad (22)$$

$$E(x) = \frac{(E_{др} - I_{\max} \rho_r / \pi y) \cdot \text{sh}[\alpha(x_m - x)] + (E_{\min} - \frac{I_{\max} \rho_r}{\pi \sqrt{x_m^2 + y^2}}) \text{sh}(\alpha x) + \frac{I_{\max} \rho_r}{\pi \sqrt{x^2 + y^2}}}{\text{Sh}(\alpha x_m)}, \quad (23)$$

где  $I_{\max}, E_{др}$  - величины тока и наложенной разности потенциалов в точке дренажа, равные

$$I_{\max} = \frac{E_{др} \cdot \text{ch}(\alpha x_m) - E_{\min}}{2z [\text{sh}(\alpha x_m) + \frac{\rho_r}{2\pi z y} \cdot \text{ch}(\alpha x_m) - \frac{\rho_r}{2\pi z \sqrt{x_m^2 + y^2}}]}; \quad (24)$$

$$E_{dp} = E_{min} \left[ \frac{\text{sh}^2(\alpha x_m) + \frac{p_r}{2\pi z y} \text{sh}(\alpha x_m) \text{ch}(\alpha x_m) + 1}{\text{ch}(\alpha x_m)} \right] \quad (25)$$

Из формулы (25), полагая  $E_{dp} = E_{max}$ , можно определить максимальную длину плеча защиты  $x_m = L_{max}/2$  одной СКЗ. Решение выполняется графоаналитически.

#### ПРИМЕР 6

Используя данные примеров I и 4, определить максимальную протяженность  $L_{max}$  трубопровода, защиту которого можно осуществить с помощью одной СКЗ, расположенной посередине участка. Принять  $y = 500$  м.

#### РЕШЕНИЕ

Воспользуемся формулой (25), положив  $E_{dp} = E_{max}$ ,  $x_m = \frac{L_{max}}{2}$  и преобразовав ее к виду

$$\frac{E_{max}}{E_{min}} = \frac{\text{sh}^2\left(\alpha \frac{L_{max}}{2}\right) + \frac{p_r}{2\pi z y} \cdot \text{sh}\left(\alpha \frac{L_{max}}{2}\right) \cdot \text{ch}\left(\alpha \frac{L_{max}}{2}\right) + 1}{\text{ch}\left(\alpha \frac{L_{max}}{2}\right)}.$$

Левая часть этого равенства не зависит от величины  $L_{max}$  и составляет  $\frac{0,55}{0,3} = 1,83$ .

Необходимо подобрать такую величину  $L_{max}$ , при которой правая часть уравнения также равна 1,83. Подбор выполняется в следующей последовательности.

1. Задаем величину  $L_{max}$ .
2. Вычисляем аргумент гиперболических функций и их величину (приложение 2).
3. Находим величину правой части уравнения.

$$\text{При } L_{max} = 10^4 \text{ м} \quad \alpha \frac{L_{max}}{2} = \frac{63,6 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4}{2} = 0,318;$$

$$\text{sh}(0,318) = 0,321; \quad \text{ch}(0,318) = 1,051;$$

$$f(L_{max}) = \frac{0,321^2 + \frac{50}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,061 \cdot 500} \cdot 0,321 \cdot 1,051 + 1}{1,051} = 1,133.$$

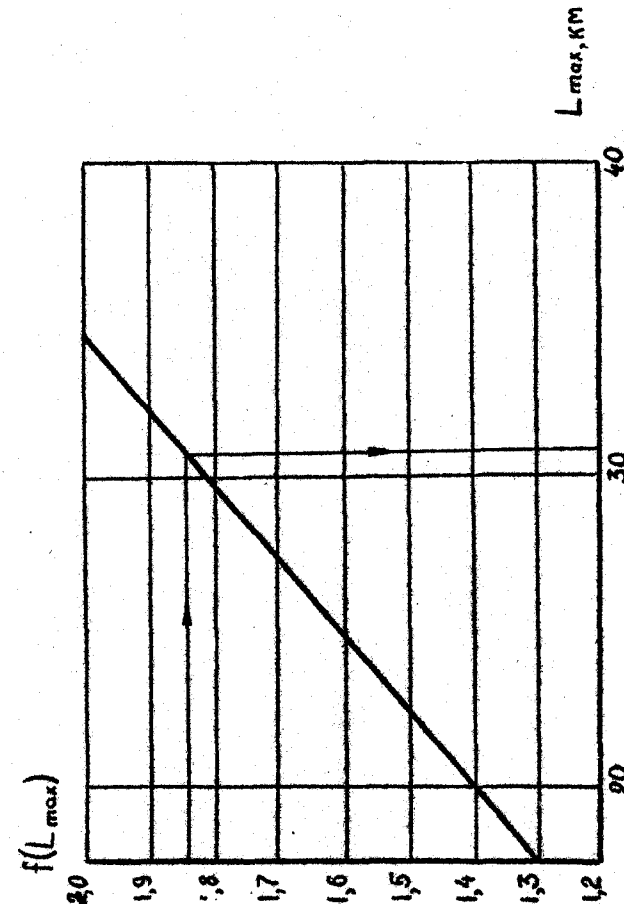


Рис. 1. Графическое определение максимальной протяженности трубопровода, защита которого возможна с помощью одной СКЗ



При  $L_{\max} = 2 \cdot 10^4 \text{ м}$   $\frac{\alpha L_{\max}}{2} = \frac{63,6 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^4}{2} = 0,636$ ;  
 $\text{sh}(0,636) = 0,679$ ;  $\text{ch}(0,636) = 1,209$ ;

$$f(L_{\max}) = \frac{0,679^2 + \frac{50}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,061 \cdot 500} \cdot 0,679 \cdot 1,209 + 1}{1,209} = 1,386.$$

При  $L_{\max} = 3 \cdot 10^4 \text{ м}$   $\frac{\alpha L_{\max}}{2} = \frac{63,6 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^4}{2} = 0,954$ ;  
 $\text{sh}(0,954) = 1,107$ ;  $\text{ch}(0,954) = 1,492$ ;

$$f(L_{\max}) = \frac{1,107^2 + \frac{50}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,061 \cdot 500} \cdot 1,107 \cdot 1,492 + 1}{1,492} = 1,780.$$

При  $L_{\max} = 3,5 \cdot 10^4 \text{ м}$   $\frac{\alpha L_{\max}}{2} = \frac{63,6 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5 \cdot 10^4}{2} = 1,113$ ;  
 $\text{sh}(1,113) = 1,360$ ;  $\text{ch}(1,113) = 1,687$ ;

$$f(L_{\max}) = \frac{1,360^2 + \frac{50}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,061 \cdot 500} \cdot 1,360 \cdot 1,687 + 1}{1,687} = 2,043.$$

Результаты расчета представлены на рис. I, графическое решение на котором дает  $L_{\max} = 31,7 \text{ км}$ .

При подключении СКЗ в начале или в конце участка трубопровода максимальная протяженность сократится вдвое и составит  $L_{\max} = 15,85 \text{ км}$ .

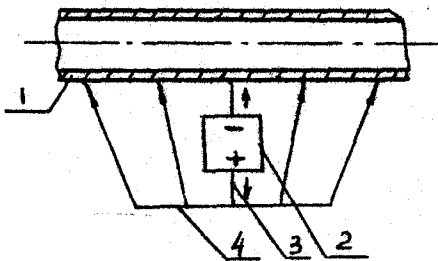


Рис. 2. Принципиальная схема катодной защиты:  
 1-трубопровод; 2-внешний источник постоянного тока;  
 3-соединительный провод; 4-анодное заземление

#### 1.2.4. Катодная защита магистрального трубопровода

При достаточной длине трубопровода его защита не может быть обеспечена одной СКЗ. Включение же в работу нескольких катодных установок, удаленных друг от друга на расстояние  $L$ , сопровождается их взаимовлиянием. Для простоты считают, что на распределение наложенной разности потенциалов  $K$  - я СКЗ оказывают влияние только соединения станции  $-(K - I)$  - я и  $(K + I)$  - я.

В этом случае распределение наложенной разности потенциалов описывается уравнением

$$E(x) = E_{\max} \frac{e^{-\alpha(l-x)} + e^{-\alpha x} + \theta \left[ \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \frac{1}{\sqrt{(l-x)^2 + y^2}} \right]}{(1 + e^{-\alpha l})(1 + \theta) + \theta \left[ \frac{1}{\sqrt{l^2 + y^2}} - \frac{1}{y} e^{-\alpha l} \right]} \quad (26)$$

Необходимую силу тока СКЗ для обеспечения защиты магистрального трубопровода определяют по формуле

$$I_{\text{др}} = \frac{E_{\max}}{z(1 + 2e^{-\alpha l} + \theta)} \quad (27)$$

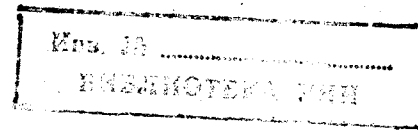
По условию трубопровод обслуживает однотипные СКЗ. Поэтому на середине расстояния между ними в точке  $X = 0,5 L$  должно выполняться условие  $E(x) \geq E_{\min}$ . Решая уравнение (26) для предельного случая  $E(x) = E_{\min}$  с учетом  $l \gg 2y$ , получим выражение для определения расстояния между СКЗ:

$$L = \frac{2}{\alpha} \ln \left[ \frac{E_{\max}}{K_B E_{\min} (1 + \theta)} \right], \quad (28)$$

где  $K_B$  - коэффициент, учитывающий влияние смежной СКЗ:

$$K_B = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left( \frac{E_{\min}}{E_{\max}} \right)^2 (1 + \theta)}} \quad (29)$$

Из уравнения (29) следует, что величина  $K_B$  в общем случае не является постоянной, а определяется величинами минимальной и максимальной наложенной разности потенциалов, состоянием



изоляционного покрытия, а также величиной удельного электросопротивления грунта, в котором проложен трубопровод.

Общее число СКЗ, необходимое для защиты трубопровода длиной  $L$ , составляет

$$N = \frac{L}{l} \quad (30)$$

#### ПРИМЕР 7

Определить число СКЗ и силу дренажного тока, необходимые для обеспечения катодной защиты магистрального трубопровода длиной  $L = 850$  км и диаметром  $D = 1020$  мм. Остальные данные взять из примеров I и 4.

#### РЕШЕНИЕ

1. Вычисляем величину коэффициента  $\theta$  на конец нормативного срока службы изоляции по формуле (26):

$$\theta = \frac{50}{2 \cdot 3,14 \cdot 6,1 \cdot 10^{-2} \cdot 500} = 0,261.$$

2. Коэффициент, учитывающий влияние смежной СКЗ, по формуле (29)

$$K_B = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{0,30}{0,55}\right)^2 \cdot (1 + 0,261)}} = 0,559.$$

3. Расстояние между СКЗ по формуле (28)

$$l = \frac{2}{63,6 \cdot 10^{-6} \cdot \ln \frac{0,55}{0,559 \cdot 0,30 \cdot (1 + 0,261)}} = 30057,8 \text{ м.}$$

4. Необходимое число СКЗ по формуле (30)

$$N = \frac{850 \cdot 10^3}{30057,8} = 28,3.$$

Округляем до ближайшего целого  $N = 29$ .

5. Сила дренажного тока в среднем за нормативный срок службы по формуле (27)

$$I_{\text{др. ср}} = \frac{0,55}{8,4 \cdot 10^{-2} \cdot (1 + 2 \cdot e^{-63,6 \cdot 10^{-6} \cdot 30057,8 \cdot 0,261})} = 4,21 \text{ А.}$$

### I.3. Расчет и оптимизация параметров установок катодной защиты

#### I.3.1. Сопротивление растеканию тока с анодного заземления

Величина сопротивления растеканию тока  $R_a$  зависит от конструкции анодного заземления.

При комбинированном поверхностном анодном заземлении

$$R_a = \frac{R_B \cdot R_r}{R_B + R_r} \quad (31)$$

При вертикальном расположении электродов

$$R_a = R_B = \frac{R_{1B}}{n_B \cdot \eta_B} \quad (32)$$

При горизонтальном расположении

$$R_a = R_r = \frac{R_{1r}}{n_r \cdot \eta_r} \quad (33)$$

где  $R_B, R_r$  - общее сопротивление растеканию тока соответственно с вертикальных и с горизонтальных электродов;

$R_{1B}, R_{1r}$  - сопротивление растеканию одиночного электрода соответственно вертикального и горизонтального;

$n_B, n_r$  - количество вертикально и горизонтально расположенных электродов в заземлении;

$\eta_B, \eta_r$  - коэффициенты экранирования.

Электроды анодного заземления могут устанавливаться либо непосредственно в грунт, либо в коксовую засыпку, существенно уменьшающую скорость их растворения. Сопротивление растеканию тока с вертикального и горизонтального электродов в коксовой засыпке определяется по формулам:

$$R_{1B} = \frac{\rho_r}{2\pi l_a} \left( \ln \frac{2l_a}{d_a} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h + l_a}{4h - l_a} + \frac{\rho_a}{\rho_r} \ln \frac{d_a}{d} \right) \quad (34)$$

$$R_{1r} = \frac{\rho_r}{2\pi l_a} \left\{ \ln \frac{2l_a}{d_a} + \ln \left[ \frac{l_a}{4h} + \sqrt{1 + \left( \frac{l_a}{4h} \right)^2} \right] + \frac{\rho_a}{\rho_r} \ln \frac{d_a}{d} \right\} \quad (35)$$

где  $L_a$  - высота (при вертикальном расположении) или длина (при горизонтальном расположении) электрода, включая засыпку;

$d_a, d$  - диаметры соответственно засыпки и электрода;

$h$  - расстояние от поверхности земли до середины электрода;

$\rho_a$  - удельное электросопротивление активатора.

При расчетах комбинированного анодного заземления величина  $L_a$  равна длине горизонтальной шины, а  $R_{1r}$  вычисляют по формуле

$$R_{1r} = \frac{\rho_r}{2\pi L_a} \ln \frac{L_a}{\sqrt{d_a h}} \quad (\text{при } L_a \gg 12h). \quad (36)$$

При установке электродов анодного заземления непосредственно в грунт

$$R_{10} = \frac{0,16 \cdot \rho_r}{L_3} \left( \ln \frac{2L_3}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h+L_3}{4h-L_3} \right);$$

$$R_{1r} = \frac{0,16 \rho_r}{L_3} \ln \frac{2L_3}{d} \quad (\text{при } h > L_3), \quad (37)$$

где  $L_3$  - длина электрода.

Габаритные размеры электродов различных типов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Габаритные размеры, масса и стоимость анодных заземлителей из железокремневых сплавов

| Тип анода | Размеры анода, мм |       | Размеры анода с активатором и металлическим кожухом, мм |       | Масса анода, кг |
|-----------|-------------------|-------|---|-------|-----------------|
|           | диаметр           | длина | диаметр   | длина |                 |
| 1         | 2                 | 3     | 4   | 5     | 6               |
| ЗЖК-12    | 40                | 1365  | -   | -     | 12              |
| ЗЖК-41r   | 75                | 1365  | -   | -     | 41              |
| AK-I      | 50                | 1400  | 185   | 1420  | 21              |
| AK-3      | 40                | 1365  | 185   | 1420  | 12              |
| AK-Ir     | 75                | 1365  | 225   | 1700  | 41              |
| AK-2r     | 40                | 1365  | 150   | 1700  | 12              |
| AKO-I     | 30                | 1400  | -   | -     | 54              |

Продолжение табл. 5

| 1     | 2   | 3         | 4 | 5 | 6     |
|-------|-----|-----------|---|---|-------|
| AKO-2 | 80  | 1500      | - | - | 52    |
| AKO-3 | 80  | 550       | - | - | 28    |
| AKO-4 | 60  | 1500+2000 | - | - | 30+40 |
| AKO-5 | 80  | 1600      | - | - | 54    |
| AKO-6 | 56  | 1940      | - | - | 32    |
| AKO-7 | 180 | 2000      | - | - | 140   |

Величина коэффициентов экранирования  $\eta_B$  и  $\eta_r$ , учитывающих взаимное влияние электродов, зависит от числа заземлителей, расстояния между ними и параметров одиночного заземлителя; она вычисляется по формуле

$$\eta = \frac{2R_1}{R_u + R_k}, \quad (38)$$

где  $R_u, R_k$  - сопротивления растеканию соответственно с центрального и крайнего электродов заземления;

$$R_u = R_1 + \frac{\rho_r}{\pi L_3} \sum_{i=1}^{n-1} F_i;$$

$$R_k = R_1 + \frac{\rho_r}{2\pi L_3} \sum_{i=1}^{n-1} F_i, \quad (39)$$

где  $F_i$  - функция:

$$F_i = \ln \left[ \frac{(B_i + \sqrt{1+B_i^2}) \sqrt{\frac{A_i + B_i + \sqrt{1+(A_i+B_i)^2}}{A_i - B_i + \sqrt{1+(A_i-B_i)^2}}}}{A_i - B_i + \sqrt{1+(A_i-B_i)^2}} \right] \quad (40)$$

$A_i, B_i$  - коэффициенты:

$$A_i = \frac{2h}{i \cdot a}; \quad B_i = \frac{L_3}{2i \cdot a}; \quad (41)$$

$a$  - расстояние между серединами электродов;

$n$  - число электродов в анодном заземлении (назначается нечетным).

При оптимизационном расчете величины коэффициентов экранирования используют для определения числа электродов заземления, функциями которого  $\eta_B$  и  $\eta_r$  являются. То есть, при оптимизации параметров СКЗ определение коэффициентов экранирования может выполняться только методом подбора. В первом приближении для

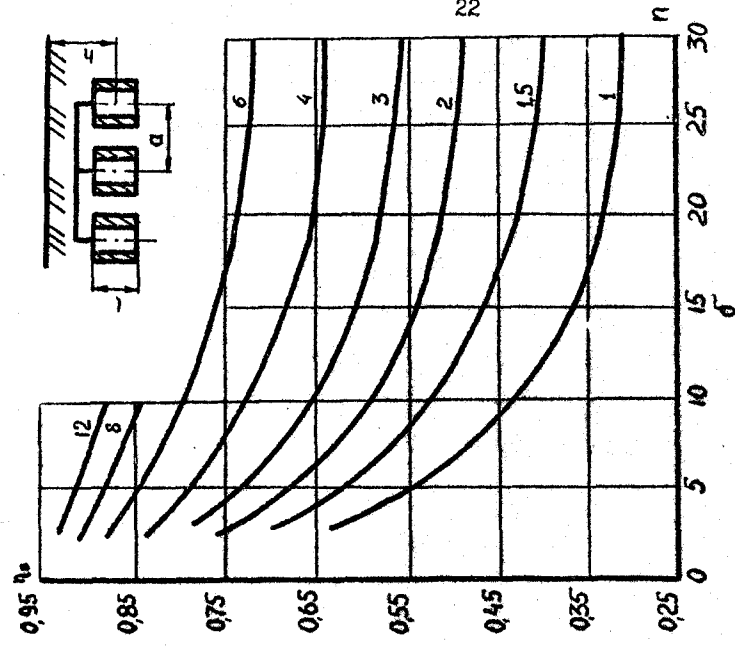
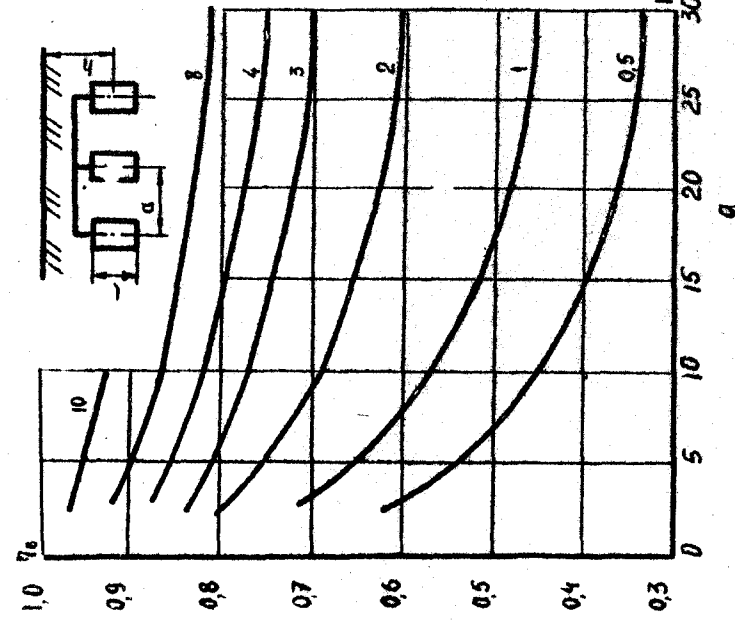


Рис. 3. Зависимость коэффициента экранирования вертикальных электродов от их числа при различных отношениях  $a/l$  :  
а-без засыпки; б-в коксовой засыпке

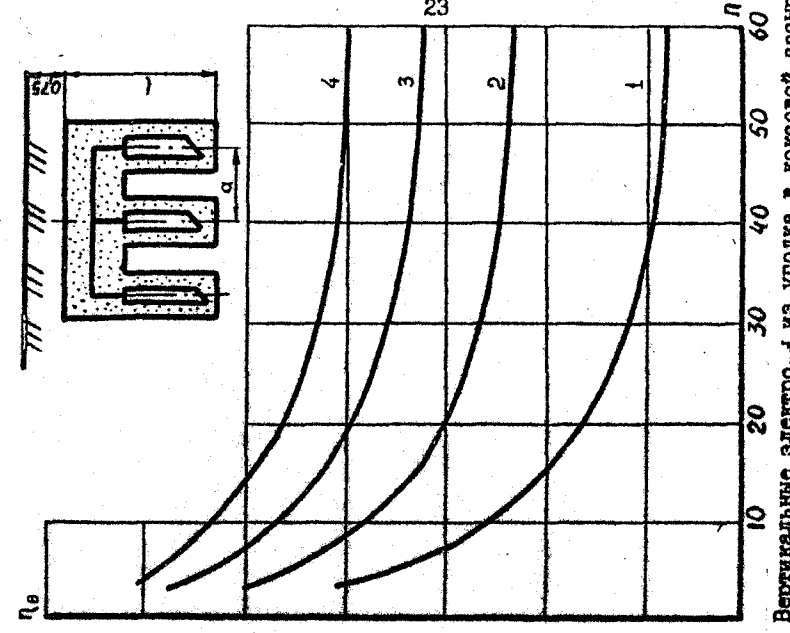
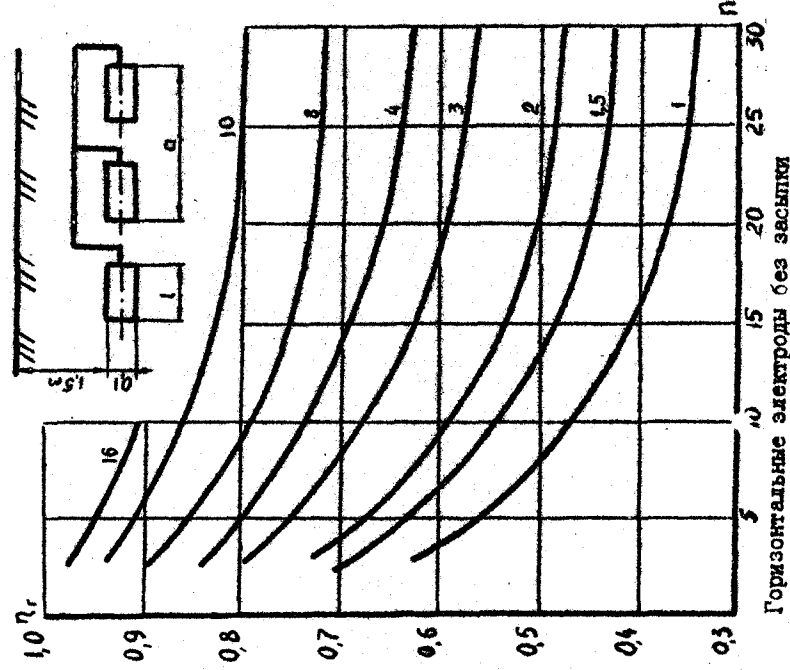


Рис. 4. Зависимость коэффициента экранирования вертикальных электродов из уголка в коксовой засыпке от их числа при различных отношениях  $a/l$  :  
а-без засыпки; б-в коксовой засыпке

вычисления величин  $R_{\Sigma}$  и  $R_K$  число электродов анодного заземления необходимо определять, выбирая  $\eta_B$  и  $\eta_r$  согласно табл. 6.

Таблица 6

Ориентировочные величины коэффициентов экранирования при вычислении сопротивлений  $R_{\Sigma}$  и  $R_K$

| $a/L_3$  | 0,5  | 1    | 2    | 3    | 4    | 6    | 10   |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\eta_B$ | 0,54 | 0,65 | 0,74 | 0,81 | 0,86 | 0,90 | 0,95 |
| $\eta_r$ | 0,50 | 0,58 | 0,63 | 0,75 | 0,80 | 0,85 | 0,90 |

С целью упрощения расчетов для стальных трубчатых электродов и электродов из уголка построены графики зависимости коэффициентов экранирования от числа заземлителей (рис. 3, 4).

Часть этих данных представлена в табл. 7, 8.

Таблица 7

Коэффициенты экранирования  $\eta_B$  вертикальных трубчатых заземлителей, размещенных в ряд, без учета влияния соединительной полосы

| Число труб,<br>шт | Отношение расстояния между трубами к их длине |             |             |
|-------------------|---|-------------|-------------|
|                   | $a/L_3 = 1$                                   | $a/L_3 = 2$ | $a/L_3 = 3$ |
| 2                 | 0,84-0,87                                     | 0,90-0,92   | 0,93-0,95   |
| 3                 | 0,76-0,80                                     | 0,85-0,88   | 0,90-0,92   |
| 5                 | 0,67-0,72                                     | 0,79-0,83   | 0,85-0,88   |
| 10                | 0,56-0,62                                     | 0,72-0,77   | 0,79-0,83   |
| 15                | 0,51-0,56                                     | 0,66-0,73   | 0,76-0,80   |
| 20                | 0,47-0,50                                     | 0,65-0,70   | 0,74-0,79   |
| 50                | 0,38-0,43                                     | 0,56-0,63   | 0,68-0,74   |

Примечание. Наименьшие значения  $\eta_B$  соответствуют  $l_3/d_3 = 20$ , наибольшие  $l_3/d_3 = 68$ , где  $d_3$  — диаметр заземлителя.

Таблица 8

Коэффициенты экранирования для горизонтальной рабочей шины анодного заземления, состоящего из расположенных в ряд вертикальных трубчатых электродов, объединенных шиной в земле

| $a/L_3$ | При количестве вертикальных труб |      |      |      |      |      |      |      |
|---------|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|         | 3                                | 4    | 5    | 8    | 10   | 20   | 30   | 50   |
| 1       | 0,81                             | 0,77 | 0,74 | 0,67 | 0,62 | 0,42 | 0,31 | 0,20 |
| 2       | 0,91                             | 0,89 | 0,86 | 0,79 | 0,75 | 0,56 | 0,46 | 0,34 |
| 3       | 0,94                             | 0,92 | 0,90 | 0,85 | 0,82 | 0,68 | 0,58 | 0,47 |

## ПРИМЕР 8

Определить сопротивление растеканию тока скомбинированного анодного заземления, состоящего из 5 вертикальных электродов типа АК-3 и горизонтальной шины. Глубина заложения электродов  $h = 2,5$  м, расстояние между ними  $a = 2$  м. Удельное электросопротивление грунта  $\rho_r = 20$  Ом.м.

## РЕШЕНИЕ

1. Электроды типа АК-3 поставляются упакованными в коксуемую мелочь. По табл. 5 определяем габаритные размеры заземлителя  $l_a = 1420$  мм,  $d_a = 185$  мм,  $d = 40$  мм,  $\rho_a = 0,4$  Ом.м.

2. Сопротивление растеканию единичного вертикального электрода по формуле (34)

$$R_{1B} = \frac{20}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,42} \left( \ln \frac{2 \cdot 1,42}{0,185} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2,5 + 1,42}{4 \cdot 2,5 - 1,42} + \frac{0,4}{20} \ln \frac{0,185}{0,04} \right) = 6,51.$$

3. Количество слагаемых под знаком суммы

$$\frac{n-1}{2} = \frac{5-1}{2} = 2; \quad n-1 = 5-1 = 4.$$

4. Расчет коэффициентов  $A_i$  и  $B_i$  представим таблицей.

| i     | 1     | 2     | 3     | 4     |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| $A_i$ | 2,5   | 1,25  | 0,833 | 0,625 |
| $B_i$ | 0,355 | 0,178 | 0,118 | 0,089 |

5. Величины сопротивления растеканию с центрального и с крайних электродов заземления по формулам (39):

$$R_K = 6,51 + \frac{20}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,42} \left\{ \ln \left[ (0,355 + \sqrt{1 + 0,355^2}) \sqrt{\frac{2,5 + 0,355 + \sqrt{1 + (0,355 + 2,5)^2}}{2,5 - 0,355 + \sqrt{1 + (2,5 - 0,355)^2}}} \right] + \right. \\ \left. + \ln \left[ (0,178 + \sqrt{1 + 0,178^2}) \sqrt{\frac{1,25 + 0,178 + \sqrt{1 + (1,25 + 0,178)^2}}{1,25 - 0,178 + \sqrt{1 + (1,25 - 0,178)^2}}} \right] + \right. \\ \left. + \ln \left[ (0,118 + \sqrt{1 + 0,118^2}) \sqrt{\frac{0,833 + 0,118 + \sqrt{1 + (0,833 + 0,118)^2}}{0,833 - 0,118 + \sqrt{1 + (0,833 - 0,118)^2}}} \right] + \right. \\ \left. + \ln \left[ (0,089 + \sqrt{1 + 0,089^2}) \sqrt{\frac{0,625 + 0,089 + \sqrt{1 + (0,625 + 0,089)^2}}{0,625 - 0,089 + \sqrt{1 + (0,625 - 0,089)^2}}} \right] \right\} = 10,57 \text{ Ом.}$$

$$R_u = 6,51 + \frac{20}{3,14 \cdot 1,42} \left\{ \ln \left[ (0,355 + \sqrt{1 + 0,355^2}) - \sqrt{\frac{2,5 + 0,355 + \sqrt{1 + (2,5 + 0,355)^2}}{2,5 - 0,355 + \sqrt{1 + (2,5 - 0,355)^2}}} \right] + \right. \\ \left. + \ln \left[ (0,178 + \sqrt{1 + 0,178^2}) \sqrt{\frac{1,25 + 0,178 + \sqrt{1 + (1,25 + 0,178)^2}}{1,25 - 0,178 + \sqrt{1 + (1,25 - 0,178)^2}}} \right] \right\} = 1957 \text{ Ом}$$

6. Коэффициент экранирования по формуле (38)

$$\eta_8 = \frac{2 \cdot 6,51}{10,51 + 9,53} = 0,648.$$

7. Сопротивление растеканию с вертикальных электродов заземления по формуле (32)

$$R_B = \frac{6,51}{5 \cdot 0,648} = 2,01 \text{ Ом}.$$

8. Сопротивление растеканию с горизонтальной шины по формуле (37)

$$R_T = R_{1T} = \frac{0,16 \cdot 20}{1,42} \ln \frac{2 \cdot 1,42}{0,04} = 9,61 \text{ Ом}.$$

9. Сопротивление растеканию тока с анодного заземления по формуле (31)

$$R_a = \frac{2,01 \cdot 9,61}{2,01 + 9,61} = 1,66 \text{ Ом}.$$

1.3.2. Мощность потребляемая СКЗ. Выбор типа СКЗ

Мощность, потребляемую катодными установками, определяют по формуле

$$P = I_{др} \cdot \Delta E, \quad (42)$$

где  $I_{др}$  - дренажный ток (ток СКЗ), равный удвоенному значению для соответствующей схемы включения СКЗ;

$\Delta E$  - напряжение на выходе СКЗ:

$$\Delta E = I_{др} (R_a + R_{пр}) + |\Delta E_1|; \quad (43)$$

$R_{пр}$  - сопротивление соединительных проводов длиной  $L_{пр}$  и сечением  $S_{пр}$ , равное

$$R_{пр} = \rho_{пр} \frac{L_{пр}}{S_{пр}}; \quad (44)$$

$\rho_{пр}$  - удельное электросопротивление материала провода;

$\Delta E_1$  - разность потенциалов в точке дренажа и в конце защи-

щаемого участка (для станции "бесконечной длины")

$\Delta E_1 = E_{\max} - E(x)$ ; для СКЗ, обслуживающей короткий трубопровод,  $\Delta E_1 = E_{др} - E_{\min}$ ; для СКЗ, обслуживающей магистральный трубопровод,  $\Delta E_1 = E_{\max} - E_{\min}$ .

В практике катодной защиты применяют медные и алюминиевые провода. Сведения о них приведены в приложении 4.

С учетом расчетных значений потребности мощности  $P$ , силы тока нагрузки  $I_{др}$  и напряжения на выходных контактах СКЗ  $\Delta E$  по табл.9 выбирается тип СКЗ.

Таблица 9

Технико-экономические характеристики катодных станций

| Тип катодной станции | Номинальные выходные параметры |               |        | Стоимость, руб. |
|----------------------|--------------------------------|---------------|--------|-----------------|
|                      | мощность, кВт                  | напряжение, В | ток, А |                 |
| КСГ(КСК)-500         | 0,5                            | 10-50         | 10     | 122             |
| КСГ(КСК)-1200        | 1,2                            | 10-60         | 20     | 190             |
| КСС-600              | 0,6                            | 24/12         | 25/50  | 329             |
| КСС-1200             | 1,2                            | 24/12         | 50/100 | 478             |
| ТСКЗ-1500            | 1,5                            | 60/30         | 25/50  | 344             |
| ТСКЗ-3000            | 3,0                            | 60/30         | 50/100 | 424             |
| ТСКЗ-5000            | 6,0                            | 120/60        | 50/100 | 504             |
| ПСК-1,2              | 1200                           | 48/24         | 25/50  | 459             |
| ПСК-5,0              | 5000                           | 96/48         | 52/104 | 560             |

#### ПРИМЕР 9

Подобрать тип СКЗ для защиты трубопровода длиной 10 км при удалении анодного заземления от него на расстояние  $Y = 400$  м.л. В системе защиты используется алюминиевый провод марки А-16 ( $\rho_{пр} = 0,023 \cdot 10^{-6}$  Ом.м.,  $S_{пр} = 15,89$  мм<sup>2</sup>). Принять, что сопротивление растеканию  $R_a = 4,374$  Ом, средняя сила дренажного тока  $I_{др,ср} = 3,17$  А, постоянная распределения тока  $\alpha = 63,6 \cdot 10^{-6}$  1/м,  $Z = 6,1 \cdot 10^{-2}$  Ом,  $R_T = 20$  Ом.м.

#### РЕШЕНИЕ

1. Сопротивление дренажного провода по формуле (44)

$$R_{пр} = 0,023 \cdot 10^{-6} \frac{400}{15,86 \cdot 10^{-6}} = 0,73 \text{ Ом}.$$

2. Аргумент и величины гиперболических функций в формуле

$$(25) \quad \alpha X_m = 63,6 \cdot 10^{-6} \frac{10 \cdot 10^3}{2} = 0,318 ;$$

$$\operatorname{sh}(0,318) = 0,321 ; \quad \operatorname{ch}(0,318) = 1,051 .$$

3. Величина наложенной разности потенциалов в точке дренажа по формуле (25)

$$E_{др} = -0,30 \cdot \left( \frac{0,321^2 + \frac{20}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,061 \cdot 400} \cdot 0,321 \cdot 1,051 + 1}{1,051} \right) = -0,33 \text{ В} .$$

4. Напряжение на контактах СКЗ по формуле (43)

$$\Delta E = 4,17 \cdot (4,374 + 0,73) + |-0,33 - (-0,30)| = 21,3 \text{ В} .$$

5. Максимальная величина тока в трубопроводе по формуле

$$(24) \quad I_{\max} = \frac{|-0,33 \cdot 1,051 - (-0,30)|}{2 \cdot 0,061 \cdot \left( 0,321 + \frac{20}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,061 \cdot 400} \cdot 1,051 - \frac{20}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,061 \sqrt{5000^2 + 400^2}} \right)} = 0,85 \text{ А}$$

6. Величина дренажного тока

$$I_{др} = 2 \cdot I_{\max} = 2 \cdot 0,85 = 1,7 \text{ А} .$$

7. Мощность, потребляемая СКЗ, по формуле (42)

$$P = 1,7 \cdot 21,3 = 36,2 \text{ Вт} .$$

8. По расчетным величинам мощности, напряжения, силы тока выбираем из табл. 9 тип СКЗ - КСТ (КСК)-500.

### 1.3.3. Срок службы анодного заземления

Срок службы анодного заземления  $T$ , установленного в грунт, определяется по формуле

$$T = \frac{G \eta_n n}{I_{др, ср} q} , \quad (45)$$

где  $G$  - вес одного электрода;

$\eta_n$  - коэффициент использования электродов,  $\eta_n = 0,77$ ;

$I_{др, ср}$  - среднее значение силы тока в цепи СКЗ;

$q$  - электрохимический эквивалент материала электродов.

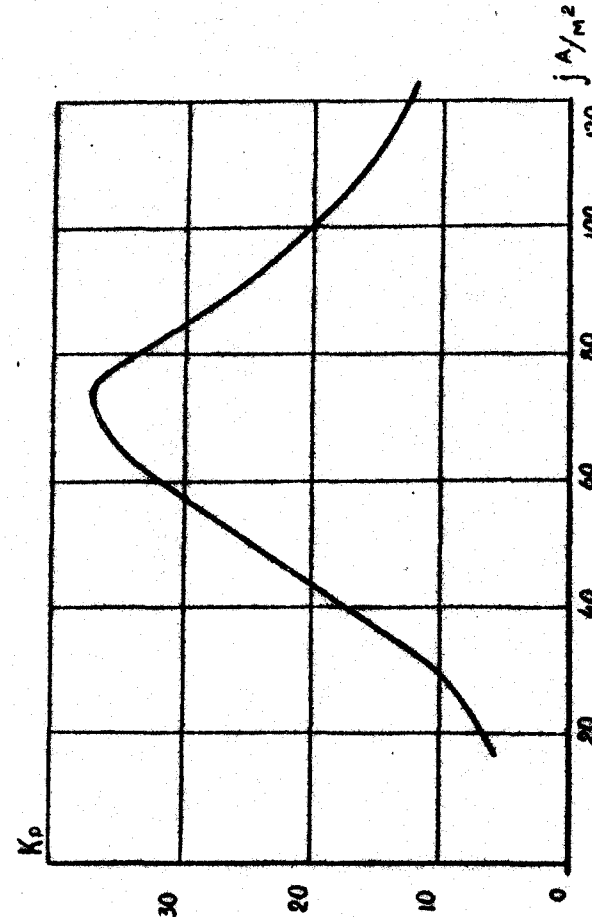


Рис. 5. Зависимость коэффициента  $K_p$  от анодной плотности тока

Согласно [10] величины электрохимического эквивалента электродов из различных материалов следующие: стальные аноды без активатора - 10 кг/(А.год); стальные аноды с активатором - 3-4 кг/(А.год); железокремнистые аноды без активатора - 0,2 кг/(А.год); железокремнистые аноды с активатором - 0,1 кг/(А.год).

Практика эксплуатации установок катодной защиты, а также специальные исследования показали, что срок службы анодных заземлений, установленных непосредственно в грунт, мало зависит от плотности тока, растекающегося с заземления. Однако при плотности тока выше 10 А/м<sup>2</sup> возможно образование на поверхности электродов слоя продуктов коррозии, обладающих высоким сопротивлением, что потребует увеличения напряжения, а следовательно, и потребляемой мощности СКЗ.

У электродов, устанавливаемых в коксовую мелочь, заметное изменение напряжения СКЗ наблюдается при плотности тока более 14 А/м<sup>2</sup>. Срок их службы

$$T_a = K_p \cdot T, \quad (46)$$

где  $K_p$  - коэффициент снижения скорости разрушения анодов, зависящий от плотности тока (рис.5)

$$j = \frac{I_{\Sigma p}}{S_a};$$

$S_a$  - суммарная поверхность рабочих электродов анодного заземления.

Если по условию задана величина электрохимического эквивалента материала электрода в коксовой засыпке, расчет срока службы заземления следует вести по формуле (45).

В случае когда расчетный срок службы анодного заземления составляет менее 10 лет, необходимо увеличить число электродов в нем.

#### ПРИМЕР 10

Определить срок службы анодного заземления из углеродистой конструкционной стали общим весом  $G = 500$  кг, если  $I_{\Sigma p. ср} = 4$  А,  $q = 8$  кг/А.год.

#### РЕШЕНИЕ

По формуле (45) срок службы заземления

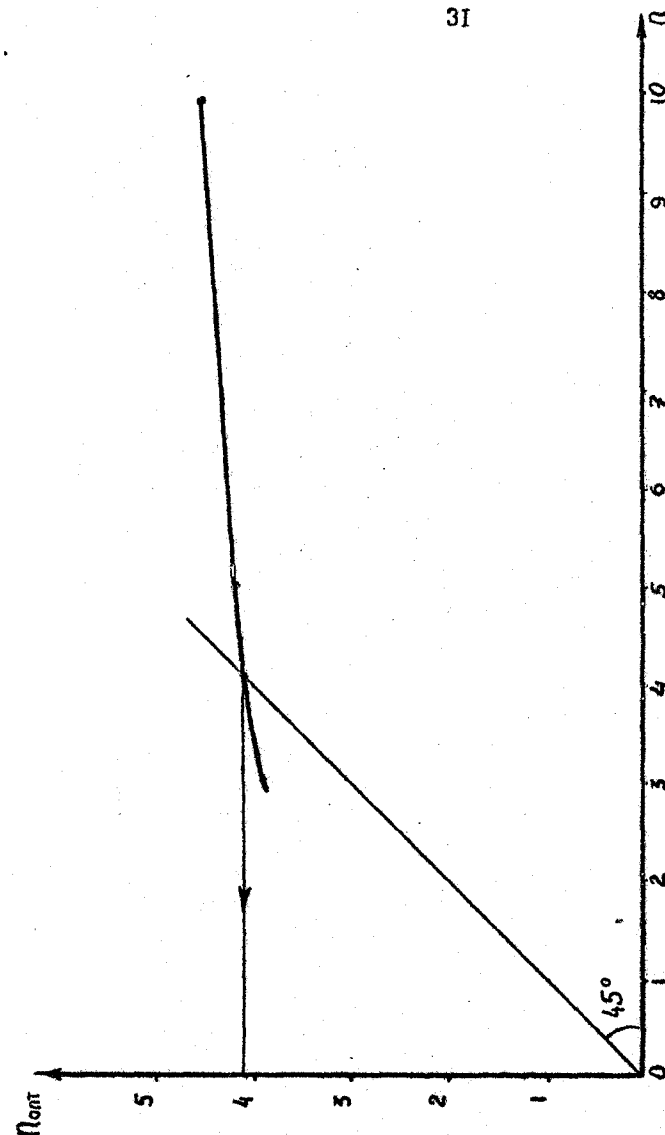


Рис.6. Графическое определение количества электродов анодного заземления



$$T = \frac{500 \cdot 0,77}{4,8} = 11,9 \text{ лет}$$

### 1.3.4. Количество электродов анодного заземления

Количество электродов анодного заземления  $\Pi$  является технико-экономической величиной. С увеличением  $\Pi$ , с одной стороны, возрастают капитальные затраты на электроды и амортизационные отчисления по ним, а с другой – уменьшается сопротивление растеканию тока с анодного заземления. Минимальной величине приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию анодного заземления соответствует оптимальное число электродов

$$\Pi_{\text{опт}} = I_{\text{пр.ср}} \sqrt{\frac{8,76 R_{1\text{в}} \cdot \zeta_3}{\zeta_a \cdot \eta \cdot \eta_{\text{и}} \cdot \eta_3 \cdot (\varepsilon + \xi)}} \quad (47)$$

где  $R_{1\text{в}}$  – сопротивление растеканию одиночного электрода, Ом;  
 $\zeta_3$  – средняя стоимость электроэнергии, руб./кВт.ч;  
 $\zeta_a$  – стоимость одного электрода, руб.;  
 $\eta$  – к п д катодной установки,  $\eta = 0,7$ ;  
 $\varepsilon$  – нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений,  $\varepsilon = 0,12$  1/год;  
 $\xi$  – норматив амортизационных отчислений для установок электрохимической защиты,  $\xi = 0,148$  1/год.

Поскольку величина коэффициента экранирования зависит от числа электродов заземления, то уравнение (47) относительно  $\Pi_{\text{опт}}$  может быть решено только методом последовательных приближений. Удобнее всего сделать это графически: задавая  $\Pi$ , вычисляя  $\eta_3$  по формулам (38) – (41), а затем по формуле (47) находят  $\Pi_{\text{опт}}$ . По результатам расчета строят кривую зависимости  $\Pi_{\text{опт}} = f(\Pi)$ . Точке её пересечения с прямой, проведенной из начала координат под углом  $45^\circ$ , соответствует фактическое значение  $\Pi_{\text{опт}}$ .

#### ПРИМЕР II

Определить оптимальное число вертикальных трубчатых электродов анодного заземления, установленных в коксовой засыпке, при следующих исходных данных:  $I_{\text{пр.ср}} = 4\text{А}$ ;  $R_{1\text{в}} = 20$  Ом;  $\zeta_3 = 0,02$  р./кВт.ч;  $\zeta_a = 25$  р.;  $\eta_{\text{и}} = 0,77$ ;  $\alpha/L_3 = 2$ .

#### РЕШЕНИЕ

1. Подставляя числовое значение заданных величин в формулу (47), получим

$$\Pi_{\text{опт}} = 4 \cdot \sqrt{\frac{8,76 \cdot 20 \cdot 0,02}{25 \cdot 0,7 \cdot 0,77 \cdot \eta_3 (0,12 + 0,148)}} = \frac{3,55}{\sqrt{\eta_3}}$$

2. Задавая  $\Pi$ , по графику  $\eta_3 = f(\Pi)$  на рис. 3,4 находим соответствующие значения коэффициента экранирования, а после подстановки в уравнение – расчетное количество электродов:

|            |                 |                            |
|------------|-----------------|----------------------------|
| $\Pi = 3$  | $\eta_3 = 0,75$ | $\Pi_{\text{опт}} = 4,099$ |
| $\Pi = 5$  | $\eta_3 = 0,70$ | $\Pi_{\text{опт}} = 4,24$  |
| $\Pi = 10$ | $\eta_3 = 0,60$ | $\Pi_{\text{опт}} = 4,58$  |

3. Нанеся полученные точки на график (рис.6), получаем, что равенство заданного и расчетного количества электродов анодного заземления имеет место при  $\Pi = 4$ , которое и является оптимальным.

Аналогично решается задача и при использовании формул (38)–(41) для нахождения коэффициента экранирования.

### 1.3.5. Сечение дренажного провода катодной установки

Полезная энергия, идущая на защиту трубопровода, расходуется на входном сопротивлении трубопровода. Она составляет в среднем 1–5 % от общего энергопотребления на катодную защиту. Другие виды потерь энергии не имеют прямого отношения к защите, однако без них невозможно её обеспечить. Так потери электроэнергии в дренажной линии составляют практически от 10 до 50 % от общего расхода энергии на защиту трубопровода.

При уменьшении сопротивления дренажной линии за счет увеличения сечения проводов  $S_{\text{пр}}$  может значительно сократиться расход бесполезно теряемой электроэнергии. Однако при увеличении  $S_{\text{пр}}$  возрастает стоимость дренажной линии. Решение технико-экономической задачи дает следующее выражение для оптимального сечения дренажного провода:

$$S_{\text{пр.опт}} = 2,95 \cdot I_{\text{пр.ср}} \cdot \sqrt{\frac{\zeta_3 \cdot \rho_{\text{пр}}}{\zeta_1 \cdot \eta \cdot (\varepsilon + \xi)}} \quad (48)$$

где  $C_1$  - коэффициент зависимости стоимости устройства  
I пог.м дренажной линии  $S_{пр}$  от сечения проводов

$$C_{пр} = C_1 S_{пр} + C_2.$$

Дренажный кабель может быть проложен либо по столбам воздушной линии, либо в траншее. Прокладка кабеля в траншее, как правило, обходится дороже. Так, для алюминиевого кабеля типа АСБ-I в траншее  $C_1 = 0,01$  р./м.мм<sup>2</sup>;  $C_2 = 1,3$  р/м, а для его подвески по столбам воздушной линии  $C_1 = 0,0035$  р/м.мм<sup>2</sup>;  $C_2 = 0,025$  р/м. Кроме того, при прокладке кабеля в траншее возможен его порыв сельскохозяйственной техникой. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только вариант прокладки дренажного кабеля по столбам воздушной линии.

#### ПРИМЕР 12

Подобрать алюминиевый дренажный провод для катодной установки. Дренажная линия - воздушная с подвеской провода на деревянных столбах с железобетонными приставками. Недостающие данные взять из примера 9, II.

#### РЕШЕНИЕ

1. По формуле (48) находим

$$S_{пр,опт} = 2,95 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{0,02 \cdot 0,029 \cdot 10^{-6}}{0,0035 \cdot 0,7 \cdot (0,12 + 0,148)}} = 0,011 \text{ мм}^2.$$

2. Выбираем ближайший больший по площади сечения алюминиевый провод марки А16.

#### 1.3.6. Удаление анодного заземления от магистрального трубопровода

С увеличением расстояния между анодным заземлением и трубопроводом  $Y$  увеличивается длина плеча защиты одной катодной станции, а следовательно, уменьшается их число и стоимость катодной защиты. Однако при увеличении  $Y$  возрастает стоимость сооружения линии постоянного тока, питающей СКЗ.

Кроме того, с удалением анодного заземления от трубопровода при той же разности потенциалов "трубопровод-грунт" в точке дренажа увеличивается сила тока катодной установки, потреб-

ляемая ею мощность, сечение проводов линии постоянного тока, число заземлителей и стоимость анодного заземления.

Выбор оптимального удаления анодного заземления от трубопровода производится из условия минимума отклонения величины приведенных расходов на сооружение и эксплуатацию о. юй катодной установки к длине её плеча защищаемого ею участка, то есть по минимуму функции

$$\frac{P}{L} = \frac{K_3 \cdot (\epsilon + \xi) + \Theta_3}{L} \quad (49)$$

Капитальные затраты  $K_3$  на осуществление катодной защиты складываются из:

- стоимости анодного заземления

$$K_a = \epsilon_a \cdot n; \quad (50)$$

- стоимости опор воздушной линии

$$K_{оп} = 2\epsilon_{ко} + \epsilon_{по} \left( \frac{Y}{50} - 1 \right); \quad (51)$$

- стоимости провода воздушной линии

$$K_{пр} = (C_1 S_{пр} + C_2) \cdot L; \quad (52)$$

- стоимости станции катодной защиты  $K_{стн}$  составляют

$$K_3 = K_a + K_{оп} + K_{пр} + K_{стн}, \quad (53)$$

где  $\epsilon_{ко}, \epsilon_{пр}$  - стоимость конечной и промежуточной опор воздушной линии, ориентировочно  $\epsilon_{ко} = 85$  р.

$$\epsilon_{пр} = 25 \text{ р.}$$

Эксплуатационные расходы складываются из амортизационных отчислений от стоимости основных фондов  $A = \xi K_3$  и стоимости электроэнергии  $\Theta_3$  на обеспечение катодной защиты:

$$\Theta_3 = \epsilon_3 \cdot P_{ср} \cdot \tau, \quad (54)$$

где  $P_{ср}$  - потребляемая СКЗ мощность, рассчитанная по средней величине дренажного тока;

$\tau$  - число часов работы катодной станции в году,

$$\tau = 8760 \text{ ч.}$$

Величина оптимального удаления анодного заземления определяется методом последовательного перебора вариантов. Рекомен-

менюется исследовать функцию  $\frac{P}{L}$  на минимум при значениях  $Y \leq 2000$  м. Причем при величине до 300 м расчеты надо выполнять с шагом 50 м, а при  $Y > 300$  м - с шагом 100 м.

Минимальное удаление анодного заземления от трубопровода определим из условия, что подкоренное выражение в формуле (29) не может быть меньше нуля, т.е. должно быть

$$(1 + \theta) \left( \frac{E_{\max}}{E_{\min}} \right)^2 \leq 1.$$

Откуда

$$Y_{\min} = \frac{R_r}{2\pi Z_k \left[ \left( \frac{E_{\max}}{E_{\min}} \right)^2 - 1 \right]}.$$

Поскольку величина  $n$  зависит от силы дренажного тока, которая в свою очередь является функцией  $Y$ , при варьировании расстояния от анодного заземления до трубопровода необходимо каждый раз оптимизировать число электродов заземления. Одновременно каждый раз вычисляют коэффициенты экранирования. То есть расчет по пункту 1.3.6 включает и расчеты по пунктам 1.3.4, 1.3.5.

Результаты расчетов оформляются в виде таблицы, в которой обязательно приводятся и результаты расчетов при оптимальном удалении анодного заземления от трубопровода.

#### ПРИМЕР 13

Определить оптимальную величину удаления анодного заземления от трубопровода диаметром  $D = 1020$  мм с толщиной стенки  $\delta = 10$  мм, если дренажная линия воздушная с подвеской алюминиевого провода, начальное переходное сопротивление "трубопровод-грунт" составляет  $R_{\text{пг}} = 20000 \text{ Ом.м}^2$ , средняя стоимость электроэнергии  $\beta_3 = 0,02 \text{ р./кВт.ч}$ , показатель скорости старения изоляции  $\beta = 0,125 \text{ 1/год}$ , тип анодного заземлителя - АК-3.

#### РЕШЕНИЕ

Расчеты выполняются по методике, которая разработана в примерах 1-12. Поэтому мы их опускаем. Представляет интерес только итоговая табл.10, где объединены результаты расчетов для различных величин.

Таблица 10

Результаты расчетов параметров катодной защиты магистрального трубопровода

| $Y, \text{ м}$ | $K_B$ | $L, \text{ км}$ | $I_{\text{др.ср}}, \text{ А}$ | $n$   | $n_{\text{окр}}$ | $R_a, \text{ Ом}$ | $S_{\text{пр}}, \text{ мм}$ | $R_{\text{пр}}, \text{ Ом}$ |
|----------------|-------|-----------------|-------------------------------|-------|------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 100            | 0,642 | 6,6             | 2,01                          | 14,53 | 15               | 3,46              | 5,72                        | 0,51                        |
| 250            | 0,575 | 23,2            | 3,57                          | 8,41  | 9                | 3,65              | 9,60                        | 0,76                        |
| 300            | 0,569 | 25,4            | 3,82                          | 7,64  | 8                | 4,374             | 15,89                       | 0,55                        |

| $\Delta E_{\text{ср}}, \text{ В}$ | $P_{\text{ср}}, \text{ кВт}$ | $\Delta_3, \frac{\text{руб}}{\text{год}}$ | $K_a, \text{ руб}$ | $K_{\text{оп}}, \text{ руб}$ | $K_{\text{ст}}, \text{ руб}$ | $K_{\text{пр}}, \text{ руб}$ | $\frac{P}{L}, \frac{\text{руб}}{\text{км.год}}$ |
|-----------------------------------|------------------------------|---|--------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---|
| 8,23                              | 16,54                        | 2,9                                       | 375                | 195                          | 200                          | 4,50                         | 31,90   |
| 15,98                             | 57,07                        | 10  | 225                | 270                          | 200                          | 14,65                        | 8,63  |
| 19,06                             | 12,83                        | 12,76                                     | 175                | 295                          | 320                          | 24,20                        | 9,09  |

#### ПРИМЕР 14

Определить оптимальные параметры катодной защиты магистрального трубопровода диаметром 820 мм, длиной 1200 км, имеющего толщину стенки, равную 9 мм.

Трубопровод прокладывается по местности, участки которой имеют следующие значения удельного электросопротивления грунта.

Распределение грунтов различного электросопротивления на трассе трубопровода

| Доля длины трубопровода $\frac{L}{L}$ | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,3 |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

Удельное электросопротивление, Ом.м

|     |     |    |    |    |    |
|-----|-----|----|----|----|----|
| 170 | 180 | 70 | 40 | 20 | 10 |
|-----|-----|----|----|----|----|

Дренажная линия - воздушная с подвеской алюминиевого провода на деревянных столбах с железобетонными приставками. Начальное переходное сопротивление "трубопровод-грунт" равно  $9000 \text{ Ом.м}^2$ , средняя стоимость электроэнергии -  $0,02 \text{ р./кВт.ч}$ , показатель скорости старения покрытия  $\beta = 0,125 \text{ 1/год}$ . Анодное

заземление выполнить из электродов длиной 1,4 м, диаметром 0,03 м, массой 10 кг. Стоимость одного электрода - 20 р., электрохимический эквивалент материала электродов - 0,2 кг/(А.год).

#### РЕШЕНИЕ

1. Определяем среднее значение удельного электросопротивления грунта вдоль трассы трубопровода по формуле (1)

$$\rho_r = \sum_{i=1}^6 \rho_{ri} \frac{L_i}{L} = 170 \cdot 0,1 + 180 \cdot 0,1 + 70 \cdot 0,2 + 40 \cdot 0,1 + 20 \cdot 0,2 + 10 \cdot 0,3 = 60 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

2. Нормальное время эксплуатации установок катодной защиты составляет 9,5 лет. Вычисляем переходное сопротивление "трубопровод-грунт" к концу нормативного срока эксплуатации установок катодной защиты по формуле (4)

$$R_{пк} = 9000 e^{-0,125 \cdot 9,5} = 2737,9 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2.$$

3. Среднее значение переходного сопротивления "трубопровод-грунт" по формуле (6)

$$R_{п.ср} = \frac{9000}{0,125 \cdot 9,5} (1 - e^{-0,125 \cdot 9,5}) = 5262,2 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2.$$

4. Сопротивление единицы длины изоляционного покрытия к концу нормативного срока эксплуатации установок катодной защиты по формуле (10)

$$R_{из}(\tau_{ис}) = \frac{2737,9}{3,14 \cdot 0,82} = 1062,9 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

5. Среднее сопротивление единицы длины изоляционного покрытия по формуле (10)

$$R_{из.ср} = \frac{5262,2}{3,14 \cdot 0,82} = 2042,8 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

6. Продольное сопротивление единицы длины трубопровода по формуле (2)

$$R_T = \frac{0,245 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,009(0,82 - 0,009)} = 10,68 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}.$$

7. Среднее значение входного сопротивления трубопровода за нормативный срок эксплуатации катодных установок по формуле (11)

$$Z_{ср} = \sqrt{\frac{10,68 \cdot 10^{-6} \cdot 1062,9}{2}} = 73,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

8. То же к концу нормативного срока эксплуатации по формуле (12)

$$Z_K = \frac{10,68 \cdot 10^{-6} \cdot 1062,9}{2} = 52,9 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

9. Постоянная распределения токов и потенциалов вдоль трубопровода к концу нормативного срока эксплуатации катодных установок по формуле (13)

$$\alpha = \sqrt{\frac{10,68 \cdot 10^{-6}}{1062,9}} = 99,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/м}.$$

10. Задаем удаление анодного заземления от трубопровода  $У = 350$  м и определяем параметр

$$\theta = \frac{60}{2 \cdot 3,14 \cdot 52,9 \cdot 10^{-3} \cdot 350} = 0,515.$$

11. Коэффициент взаимного влияния СКЗ по формуле (29)

$$K_8 = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{0,3}{0,55}\right)^2} \cdot (1 + 0,515)} = 0,574.$$

12. Протяженность зоны защиты трубопровода одной СКЗ к концу нормативного срока эксплуатации по формуле (28)

$$L_1 = \frac{2}{99,6 \cdot 10^{-6}} \ln \left[ \frac{0,55}{0,574 \cdot \frac{0,3}{0,55} (1 + 0,515)} \right] = 15071 \text{ м}.$$

13. Среднее значение силы тока нагрузки СКЗ по формуле (27)

$$I_{ар.ср} = \frac{0,55}{73,4 \cdot 10^{-3} [1 + 2 \exp(-99,6 \cdot 10^{-6} \cdot 15071) + 0,515 \frac{52,9 \cdot 10^{-3}}{73,4 \cdot 10^{-3}}]} = 4,13.$$

14. Примем, что глубина заложения середины электродов анодного заземления  $h$  равна 2,2 м, а расстояние между ними равно 7 м.

15. Сопротивление растеканию с одиночного вертикально установленного электрода по формуле (34)

$$R_{18} = \frac{0,16 \cdot 60}{1,4} \left( \ln \frac{2 \cdot 1,4}{0,03} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2,2 + 1,4}{4 \cdot 2,2 - 1,4} \right) = 31,9 \text{ Ом}.$$

16. Примем число электродов анодного заземления  $n = 5$ .

Расчет коэффициентов  $A_I$  и  $B_I$  представим таблицей.

| i     | 1    | 2    | 3     | 4     |
|-------|------|------|-------|-------|
| $A_I$ | 0,63 | 0,31 | 0,21  | 0,16  |
| $B_I$ | 0,1  | 0,06 | 0,033 | 0,025 |

17. Сопротивление растеканию с центрального электродного заземления по формуле (39)

$$R_{\text{ц}} = 31,9 + \frac{60}{3,14 \cdot 1,4} \left\{ \ln \left[ (0,1 + \sqrt{1 + 0,1^2}) \cdot \sqrt{\frac{0,63 + 0,1 + \sqrt{1 + (0,63 + 0,1)^2}}{0,63 - 0,1 + \sqrt{1 + (0,63 - 0,1)^2}}} \right] + \right. \\ \left. + \ln \left[ (0,05 + \sqrt{1 + 0,05^2}) \cdot \sqrt{\frac{0,31 + 0,05 + \sqrt{1 + (0,31 + 0,05)^2}}{0,31 - 0,05 + \sqrt{1 + (0,31 - 0,05)^2}}} \right] \right\} = 35,72 \text{ Ом.}$$

18. Сопротивление растеканию с крайнего электрода анодного заземления по формуле (39)

$$R_{\text{к}} = 31,9 + \frac{60}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,4} \left\{ \ln \left[ (0,1 + \sqrt{1 + 0,1^2}) \cdot \sqrt{\frac{0,63 + 0,1 + \sqrt{1 + (0,63 + 0,1)^2}}{0,63 - 0,1 + \sqrt{1 + (0,63 - 0,1)^2}}} \right] + \right. \\ + \ln \left[ (0,05 + \sqrt{1 + 0,05^2}) \cdot \sqrt{\frac{0,31 + 0,05 + \sqrt{1 + (0,31 + 0,05)^2}}{0,31 - 0,05 + \sqrt{1 + (0,31 - 0,05)^2}}} \right] + \\ + \ln \left[ (0,033 + \sqrt{1 + 0,033^2}) \cdot \sqrt{\frac{0,21 + 0,033 + \sqrt{1 + (0,21 + 0,033)^2}}{0,21 - 0,033 + \sqrt{1 + (0,21 - 0,033)^2}}} \right] + \\ \left. + \ln \left[ (0,025 + \sqrt{1 + 0,025^2}) \cdot \sqrt{\frac{0,16 + 0,025 + \sqrt{1 + (0,16 + 0,025)^2}}{0,16 - 0,025 + \sqrt{1 + (0,16 - 0,025)^2}}} \right] \right\} = 34,59 \text{ Ом.}$$

19. Коэффициент экранирования электродов анодного заземления по формуле (38)

$$\eta_3 = \frac{2 \cdot 31,9}{35,72 + 34,59} = 0,91.$$

20. Оптимальное число электродов анодного заземления по формуле (47)

$$n'_3 = 4,13 \cdot \sqrt{\frac{8,76 \cdot 31,9 \cdot 0,02}{20 \cdot 0,95 \cdot 0,7 \cdot 0,91 \cdot (0,15 + 0,148)}} = 5,1.$$

То есть принятое и расчетное число электродов совпадают.

21. Сопротивление растеканию тока с анодного заземления по формуле (32)

$$R_a = \frac{31,9}{5 \cdot 0,91} = 7 \text{ Ом.}$$

22. Оптимальное сечение дренажного провода по формуле (48)

$$S_{\text{пр}} = 2,95 \cdot 4,13 \cdot \sqrt{\frac{0,029 \cdot 0,02}{0,01 \cdot 0,7 \cdot (0,15 + 0,148)}} = 6,7 \text{ мм}^2.$$

Выбираем ближайшее большее сечение серийно выпускаемых проводов, которое равно  $S_{\text{пр}} = 16 \text{ мм}^2$  (провод А-16).

23. Сопротивление дренажной линии по формуле (44)

$$R_{\text{пр}} = 0,029 \cdot \frac{350}{9,6} = 1,05 \text{ Ом.}$$

24. Среднее значение напряжения на выходных контактах СКЗ по формуле (43)

$$\Delta E_{\text{ср}} = 4,13(7 + 1,05) + (0,55 - 0,3) = 37,5 \text{ В.}$$

25. Средняя величина мощности, потребляемой СКЗ, по формуле (42)

$$P_{\text{ср}} = 4,13 \cdot 37,5 = 154,9 \text{ Вт.}$$

26. В соответствии с найденными значениями  $I_{\text{др.ср}}$ ,  $\Delta E_{\text{ср}}$  и  $P_{\text{ср}}$  выбираем тип катодной станции - КСТ (КСК)-500 с параметрами: мощность - 0,5 кВт; напряжение на контактах - 10:50 В; ток - 10А; стоимость - 410 р.

27. Выполняем расчет экономических показателей катодной защиты при принятом удалении анодного заземления от трубопровода:

$K_a$  - стоимость анодного заземления:

$$K_a = 20 \cdot 5 = 100 \text{ р.};$$

$K_{\text{оп}}$  - стоимость опор воздушной линии:

$$K_{оп} = 2 \cdot 85 + 25 \left( \frac{350}{50} - 1 \right) = 320 \text{ р.};$$

$K_{пр}$  - стоимость провода воздушной линии:

$$K_{пр} = (0,01 \cdot 9,6 + 1,3) \cdot 350 = 488,6 \text{ р.};$$

$K_3$  - капитальные затраты на одну СКЗ:

$$K_3 = 100 + 320 + 488,6 + 410 = 1318 \text{ р.};$$

$\mathcal{E}_\Lambda$  - стоимость электроэнергии, потребляемой одной СКЗ:

$$\mathcal{E}_\Lambda = 0,02 \cdot \frac{154,9}{1000} \cdot 8760 = 27,1 \frac{\text{р.}}{\text{год}};$$

$\frac{P}{L}$  - удельные приведенные затраты на катодную защиту:

$$\frac{P}{L} = \frac{27,1 + 1318 \cdot (0,15 + 0,148)}{15,071} = 19,1 \frac{\text{р.}}{\text{км}}.$$

28. Задавая другие значения удаления анодного заземления от трубопровода, аналогично вычисляем удельные приведенные затраты на катодную защиту и для них. Результаты расчетов представим таблицей.

Результаты расчетов по определению оптимального удаления анодного заземления от трубопровода

| Показатели, их!<br>размерность  | Величина показателей при удалении, м |       |        |        |        |        |
|---------------------------------|--------------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
|                                 | 200                                  | 250   | 300    | 350    | 400    | 450    |
| $K_B$                           | 0,592                                | 0,587 | 0,58   | 0,574  | 0,568  | 0,566  |
| $L$ , км                        | 9,15                                 | 11,05 | 13,1   | 15,071 | 17,2   | 19,8   |
| $I_{пр.ср}$ , А                 | 3,05                                 | 3,4   | 3,78   | 4,13   | 4,49   | 4,85   |
| $n_z$ , шт                      | 3                                    | 3     | 4      | 5      | 5      | 6      |
| $R_a$ , Ом                      | 8                                    | 8     | 7,5    | 7      | 7      | 6,5    |
| $S_{пр}$ , мм <sup>2</sup>      | 9,6                                  | 9,6   | 9,6    | 9,6    | 9,6    | 9,6    |
| $R_{пр}$ , Ом                   | 0,79                                 | 0,87  | 0,96   | 1,05   | 1,14   | 1,25   |
| $\Delta E_{ср}$ , В             | 28,6                                 | 29,5  | 33,4   | 37,5   | 41,6   | 46,2   |
| $P_{ср}$ , Вт                   | 87,2                                 | 89,7  | 126,3  | 154,9  | 186    | 224,1  |
| $K_a$ , руб.                    | 60                                   | 60    | 60     | 100    | 100    | 120    |
| $K_{оп}$ , руб.                 | 245                                  | 270   | 296    | 320    | 345    | 370    |
| $K_{пр}$ , руб.                 | 279,2                                | 349   | 418,8  | 488,6  | 558,4  | 632,1  |
| $K_3$ , руб.                    | 994,2                                | 1080  | 1213,8 | 1318   | 1413,4 | 1632,1 |
| $\mathcal{E}_\Lambda$ , руб/год | 14,1                                 | 18,7  | 22,9   | 27,1   | 31,3   | 35,5   |
| $\frac{P}{L}$ , руб/км          | 30,1                                 | 25,2  | 19,3   | 19,1   | 20,4   | 22,6   |

29. По результатам расчета строим график в координатах  $\frac{P}{L} - y'$ , откуда видно, что оптимальным удалением анодного заземления является  $y = 350$  м.

30. Для варианта, когда удельные приведенные затраты на катодную защиту минимальны, т.е.  $y = 350$  м, определяем необходимое число СКЗ для защиты всего трубопровода:

$$N = \frac{1200}{15,071} \approx 80.$$

31. Срок службы анодного заземления по формуле (45)

$$T = \frac{10 \cdot 0,95 \cdot 5}{4,13 \cdot 0,2} = 57,5 \text{ лет.}$$

Поскольку срок службы анодного заземления превышает 10 лет, то, следовательно, катодная защита трубопровода обеспечена. В противном случае необходимо увеличить число электродов анодного заземления.

#### 1.4. Методы увеличения зоны защиты катодных установок

В условиях, когда электроснабжение установок катодной защиты на трассе трубопровода затруднено, необходимо использовать все возможности для увеличения зоны защиты СКЗ. Это можно достичь, повышая наложенную разность потенциалов в точке дренажа. Однако максимальная величина наложенной разности потенциалов регламентирована. Поэтому в практике катодной защиты нашли применение катодные установки с противопотенциалом и с экранными заземлениями. Целесообразность их использования в каждом конкретном случае обосновывается технико-экономическим расчетом.

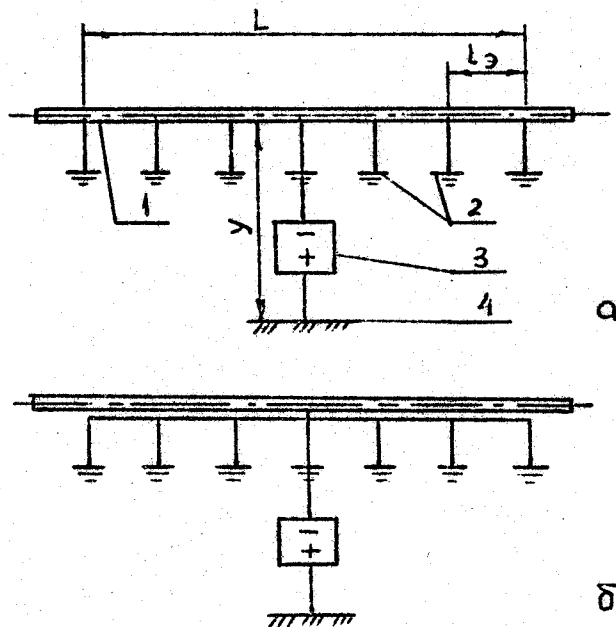


Рис. 7. Схема катодной защиты с экранными заземлениями:  
а - экраны подключены к трубопроводу; б - экраны подключены к минусу катодной станции.  
1- трубопровод; 2- экранные заземления; 3- катодная станция;  
4- анодное заземление

#### 1.4.1. Катодные установки с экранными заземлениями

Экранные заземления подключаются либо непосредственно к минусу катодной станции, либо к трубопроводу (рис. 7).

При подключении экранных заземлений в районе участка, где имеется превышение наложенной разности потенциалов сверх допустимой, поступление тока анодного заземления в трубопровод ограничивается, и тем самым снижается потенциал трубопровода на этом участке.

Экранные заземления можно располагать по обе стороны от трубопровода, а выполнять их рекомендуется в виде горизонтальных электродов.

Наложённая разность потенциалов в точке дренажа  $E'_{\max}$ , необходимая для обеспечения защиты повышенной протяженности  $L$ , определяется по формуле

$$E'_{\max} = \frac{0,5 E_{\min} e^{\frac{\alpha L'}{2}}}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1-K}{\theta}} \left[ \frac{2y}{L'} e^{\frac{\alpha L'}{2}} - \frac{K}{\theta} - 1 \right]}, \quad (55)$$

где  $K$  - коэффициент, равный отношению суммарного тока экранов  $I_{\Sigma}$  к току катодной установки  $I_{\text{кр}}$  (ориентировочно  $K = 0,05 + 0,25$ ).

Для определения длины участка, на котором необходимо устанавливать экранные заземления, пользуются формулой

$$L_{\Sigma} = \frac{2}{\alpha} \ln \left[ \frac{1-2K}{\frac{E_{\max}}{E_{\min}} (1-K+\theta) - \frac{2\rho_r y}{\sqrt{L_{\Sigma}^2 + 4y^2}}} \right]. \quad (56)$$

Расстановку экранных заземлений рекомендуется выполнять в соответствии с рекомендациями табл. II.

Необходимое число экранных заземлений

$$n_{\Sigma} = 1 + \frac{L_{\Sigma}}{\Delta L_{\Sigma}}. \quad (57)$$

Таблица II

Рекомендуемые расстояния между экранами  $\Delta l_3$  и между экранами к трубопроводам  $Y_3$  в зависимости от диаметра трубопровода

| D, мм            | 377 | 529 | 720 | 820 | 1020 | 1220 | 1420 |
|------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| $\Delta l_3$ , м | 16  | 21  | 28  | 32  | 40   | 46   | 55   |
| $Y_3$ , м        | 4,5 | 6   | 8   | 9   | 11   | 13   | 15   |

Эффективность работы катодных установок с экранными заземлениями существенно зависит от сопротивления растеканию с экранных заземлений. При чрезмерном увеличении сопротивления цепи экрана не достигается нужного снижения разности потенциалов "труба-грунт", чрезмерное уменьшение сопротивления приводит к повышенному расходу электроэнергии, а иногда и к уменьшению длины защитной зоны.

Необходимая величина сопротивления цепи "экран-трубопровод" определяется по формуле

$$R_{цз} = \frac{R_r}{2\pi l_3 (E'_{max} - E_{max} - kZl_{op})} \left[ \frac{l_3 E'_{max}}{Y} + \frac{2l_3' E'_{max} - E_{max}}{\Delta l_3} \right] \cdot (58)$$

$$\cdot \left( 0,557 + \ln \frac{n_3 - 1}{2} + \frac{1}{n_3 - 1} \right) - 2(n_3 - 1)(E'_{max} - E_{max}) \cdot (58)$$

Зная величину  $R_{цз}$ , проектируют обеспечивающую его конструкцию экранного заземления с учетом сопротивления одиночного электрода, его размеров и эффекта экранирования.

Сила тока катодной установки с экранными заземлениями определяется по формуле

$$I_{op} = \frac{E'_{max}}{Z(1 - k + \theta)} \quad (59)$$

Суммарная сила тока экранных заземлений определяется по выражению

$$I_3 = \frac{1}{R_{цз}} \left[ E_{max}(n_3 - 1) + n_3 E'_{max} - \frac{\Delta l_3 (E'_{max} - E_{max})(n_3 - 1)}{2l_3} \right] \quad (60)$$

Зная величины  $l_{op}$  и  $l_3$ , уточняют значение коэффициента  $k = \frac{l_3}{l_{op}}$ . Если расхождение ранее принятого и расчетного значений  $k$  превышает 20 %, то расчет параметров катодной установки с экранными заземлениями необходимо повторить, задав вторую величину коэффициента  $k$ .

## ПРИМЕР 15

При работе СКЗ, обслуживавшей трубопровод диаметром  $D = 377$  мм с входным сопротивлением  $Z = 0,08$  Ом и постоянной распределения  $\alpha = 1,86 \cdot 10^{-4}$  1/м, обеспечивается зона защиты длиной 12,1 км. По местным условиям необходимо обеспечить защиту участка трубопровода длиной  $l' = 15$  км. Определить параметры катодной установки с экранными заземлениями, если  $R_r = 20$  Ом·м,  $Y = 500$  м,  $E_{max} = 0,55$  В,  $E_{min} = 0,3$  В.

## РЕШЕНИЕ

- Находим  $\theta = \frac{20}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,08 \cdot 500} = 0,08$ .
- Полагая  $k = 0,25$ , по формуле (55) находим  $E'_{max} = \frac{0,5 \cdot 0,3 \exp\left(\frac{1,86 \cdot 10^{-4} \cdot 15 \cdot 10^3}{2}\right)}{1 + \frac{1}{1 - 0,25} \left[ \frac{2 \cdot 500}{15 \cdot 10^3} \exp\left(\frac{1,86 \cdot 10^{-4} \cdot 15 \cdot 10^3}{2}\right) - \frac{0,025}{0,08} - 1 \right]} = 0,96$  В.
- Сила тока катодной установки по формуле (59)  $I_{op} = \frac{0,96}{0,08(1 - 0,25 + 0,08)} = 14,46$  А.
- По табл. 12 находим удаление экрана от трубопровода и расстояние между экранными заземлениями  $Y = 4,5$  м;  $\Delta l_3 = 16$  м.
- Протяженность участка трубопровода, на котором необходимо установить экранные заземления, определяется из уравнения (56) методом последовательных приближений.

Принимаем  $l_3 = 1600$  м по формуле (56):

$$l_3 = \frac{2}{1,86 \cdot 10^{-4}} \ln \frac{1 - 2 \cdot 0,25}{\frac{0,55}{0,96} (1 - 0,25 + 0,08) - \frac{2 \cdot 20 \cdot 500}{\sqrt{1600^2 + 4 \cdot 500^2}}} = 1'80 \text{ м.}$$

Принимаем  $l_3 = 1500$  м. Тогда



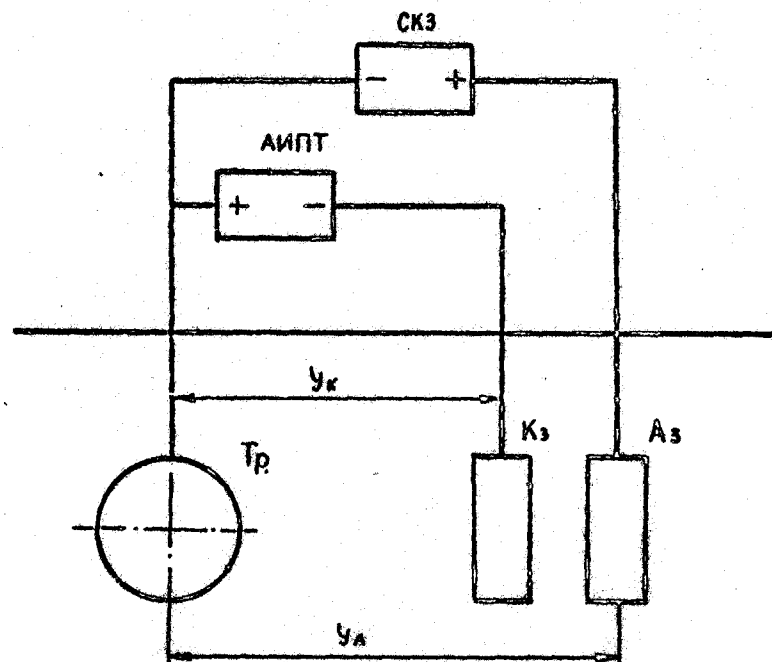


Рис.8. Схема катодной установки с противопотенциалом:

Т<sub>р</sub> - трубопровод;  
 Кз - катодное заземление;  
 Аз - анодное заземление;  
 АИПТ - автономный источник постоянного тока;  
 СКЗ - станция катодной защиты

$$L_3 = \frac{2}{1,86 \cdot 10^{-4}} \ln \frac{1 - 2 \cdot 0,25}{\frac{0,55}{0,96} (1 - 0,25 + 0,08) - \frac{2 \cdot 20 \cdot 500}{\sqrt{1500^2 + 4 \cdot 500^2}}} = 1560 \text{ м.}$$

Поскольку расчетная величина  $L_3$  практически равна заданной, в дальнейшем будем считать  $L_3 = 1560 \text{ м.}$

6. Число экранных заземлений по формуле (57)

$$n_3 = 1 + \frac{1560}{16} = 97.$$

7. Необходимая величина сопротивления цепи экранного заземления по формуле (58)

$$R_{цз} = \frac{20}{2 \cdot 3,14 \cdot 1560 \cdot (0,96 - 0,55 - 0,25 \cdot 0,08 - 14,4)} \cdot \left[ \frac{1560 \cdot 0,96}{4,5} + \frac{2 \cdot 1560 \cdot 1,51}{16} \cdot \left( 0,577 + \ln \frac{97-1}{2} + \frac{1}{97-1} \right) - 2(97-1)(0,96 - 0,55) \right] = 29,3 \text{ Ом.}$$

8. Суммарная сила тока экранных заземлителей по формуле (57)

$$I_3 = \frac{1}{29,3} \left[ 0,55(97-1) + 97 \cdot 0,96 - \frac{16(0,96 - 0,55)(97^2 - 1)}{2 \cdot 1560} \right] = 4,25 \text{ А.}$$

9. Расчетная величина коэффициента  $K$  составляет

$$K = \frac{4,25}{14,4} = 0,295.$$

10. Расхождение расчетной и принятой в расчете величин составляет

$$\frac{0,295 - 0,25}{0,25} \cdot 100 = 18\% < 20\%.$$

Поэтому повторный расчет производить не следует. Остальные параметры установки определяются как и для обычной СКЗ.

#### 1.4.2. Катодные установки с противопотенциалом

В отличие от обычной СКЗ катодная установка с противопотенциалом содержит дополнительные катодные заземления с автономным источником постоянного тока (рис. 8).

Эффект применения катодных заземлений такой же, как экран-

ных заземлений. Их устанавливают в районе точки дренажа на расстоянии 20-40 м от трубопровода с любой стороны. При этом минус дополнительного источника тока подключается к катодному заземлению, плюс - к трубопроводу.

Распределение наложенной разности потенциалов вдоль трубопровода при работе СКЗ с противопотенциалом описывается выражением

$$E(x) = a \cdot e^{-\alpha x} + \frac{B}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{C}{\sqrt{x^2 + y_k^2}}, \quad (61)$$

где  $a, B, C$  - коэффициенты, равные:

$$a = E_{\max a} \left( \frac{1}{\theta_a} - \frac{1}{\theta_k} \right) + \frac{E_{\min}}{\theta};$$

$$B = y E_{\max a} \cdot \frac{\theta}{\theta_a};$$

$$C = y \frac{\theta}{\theta_k} (E_{\max a} - E_{\min}); \quad (62)$$

$E_{\max a}$  - величина наложенной разности потенциалов в точке дренажа, при которой обеспечивается защита участка трубопровода длиной  $l'$ .

$$E_{\max a} = E_{\min} \frac{\theta_k e^{\frac{\alpha l'}{2}} - 1}{\frac{\theta_a \theta_k}{\theta_a \theta_k} - 1}, \quad (63)$$

где  $\theta_a, \theta_k$  - коэффициенты, равные:

$$\theta_a = 1 + \theta; \quad \theta_k = 1 + \frac{y}{x_k} \theta; \quad (64)$$

$y_k$  - удаление катодного заземления от трубопровода.

Кривая распределения суммарной разности наложенных потенциалов "трубопровод-грунт" вдоль трубопровода имеет явно выраженный максимум вблизи точки дренажа. Этот максимум не должен превышать значение  $E_{\max}$  регламентируемое ГОСТом 9.015.74.

Выполнение условия  $E(x) \leq E_{\max}$  добиваются варьированием величины  $y_k$ .

Расстояние  $x$  от точки дренажа до сечения, в котором суммарная наложенная разность потенциалов достигает максимума, определяется методом последовательных приближений из уравнения

$$\alpha = f(x).$$

$$\text{где } f(x) = \frac{1}{x} \ln \frac{\alpha \cdot a}{x [c(x^2 + y_k^2)^{-1,5} - B(x^2 + y^2)^{-1,5}]} \quad (65)$$

Сила тока катодной установки вычисляется по зависимости

$$I_{\partial p a} = \frac{E_{\max a}}{Z(1 + \theta)}. \quad (66)$$

Напряжение на контактах СКЗ

$$\Delta E_a = I_{\partial p a} (R_{np} + R_a) + |E_{\max a} - E_d(l')|, \quad (67)$$

где  $E_d(l')$  - наложенная разность потенциалов на расстоянии  $l'$  от точки дренажа, где поддерживается потенциал  $E_{\max a}$  в случае, когда противопотенциал не создается.

Противопотенциал, создаваемый в точке дренажа автономным источником постоянного тока, вычисляют по формуле

$$E_{\min k} = \frac{E_{\max a} - E_{\min}}{\theta_k} e^{-\frac{\alpha l'}{2}}. \quad (68)$$

Сила тока автономного источника

$$I_{\partial p k} = \frac{E_{\max a} - E_{\min}}{Z(1 + \theta_k)} \quad (69)$$

Напряжение на его контактах

$$\Delta E_k = I_{\partial p k} (R_{npk} + R_k) + |E_{\min k} - E_k(l')|, \quad (70)$$

где  $R_{npk}, R_k$  - сопротивление соответственно проводов катодной установки и растекания тока с катодного заземления;

$E_k(l')$  - наложенная разность потенциалов, которую создавал автономный источник постоянного тока на расстоянии  $l'$ , если бы был включен только он.

Зная величины  $I_{\partial p a}, I_{\partial p k}, \Delta E_a, \Delta E_k$  по формуле (42) можно вычислить мощность, необходимую для питания СКЗ и автономного источника постоянного тока.

## ПРИМЕР 16

Для условий примера 14 определить параметры катодной установки с противопотенциалом.

## РЕШЕНИЕ

1. Назначаем  $Y_k = 25$  м.

2. Определяем коэффициенты  $\theta_a$  и  $\theta_k$  по формуле (64):

$$\theta_a = 1 + 0,08 = 1,08;$$

$$\theta_k = 1 + \frac{500}{25} \cdot 0,08 = 2,6.$$

3. Коэффициент, учитывающий влияние смежной СКЗ по формуле (29),

$$K_B = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{0,3}{0,55}\right)^2 \cdot (1 + 0,08)}} = 0,55.$$

4. Наложенная разность потенциалов в точке дренажа для вазиты участка трубопровода длиной 15 км по формуле (70)

$$E_{\max a} = 0,3 \frac{2,6 \cdot e^{\frac{1,86 \cdot 10^{-4} \cdot 15 \cdot 10^3}{2}} - 1}{\frac{2,6}{1,08 \cdot 0,55} - 1} = 0,84 \text{ В.}$$

5. Наложенная разность потенциалов автономного источника питания в точке дренажа по формуле (68)

$$E_{\min k} = \frac{0,84 - 0,3}{2,6} \cdot e^{\frac{1,86 \cdot 10^{-4} \cdot 15 \cdot 10^3}{2}} = 0,051 \text{ В.}$$

6. Коэффициенты, входящие в уравнение (61), по формуле (62)

$$a = 0,84 \cdot \left(\frac{1}{1,08} - \frac{1}{2,6}\right) + \frac{0,3}{2,6} = 0,57;$$

$$b = 500 \cdot 0,84 \cdot \frac{0,08}{1,08} = 31,11;$$

$$c = 500 \cdot \frac{0,08}{2,6} \cdot (0,84 - 0,3) = 8,31.$$

7. Задавая  $X = 200$  м, вычисляем величину правой части уравнения (65):

$$f(x) = \frac{1}{200} \ln \frac{0,57 \cdot 1,86 \cdot 10^{-4}}{200 \cdot [8,31 \cdot (200^2 + 2,5^2)^{-1,5} + 31,11(200^2 + 500^2)^{-1,5}]}^{2,2 \cdot 10}$$

Данный расчет повторяем еще для нескольких величин. Результаты расчетов представим таблицей.

| X, мм        | 200                  | 210                  | 220                  | 230                  | 240                 |
|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Правая часть | $-2,2 \cdot 10^{-3}$ | $-1,4 \cdot 10^{-3}$ | $-0,8 \cdot 10^{-3}$ | $-0,2 \cdot 10^{-3}$ | $0,3 \cdot 10^{-3}$ |

По результатам расчета строим график зависимости  $f(x)$  от  $X$  и определяем абсциссу точки пересечения этой кривой с прямой  $f(x) = x = 1,86 \cdot 10^{-4}$  (рис. 9). Ей соответствует сечение  $X = 237,5$  м от точки дренажа.

8. Максимальная величина суммарной наложенной разности потенциалов "трубопровод-грунт" при  $X = 237,5$  м по формуле (61) составит

$$E(x)_{X=237,5} = 0,57e^{-1,86 \cdot 10^{-4} \cdot 237,5} + \frac{31,11}{\sqrt{500^2 + 237,5^2}} + \frac{8,31}{\sqrt{25^2 + 237,5^2}} = 0,57 \text{ В.}$$

Вычисленное значение несколько превосходит максимально допустимое значение  $E_{\max} = 0,55$  В. Поэтому удаление катодного заземления необходимо увеличить.

Принимаем  $Y_k = 30$  м и расчет производим вновь.

1.  $\theta_a = 1 + 0,08 = 1,08.$

2.  $\theta_k = 1 + \frac{500}{30} \cdot 0,08 = 2,33.$

3.  $K_B = 0,55.$

4.  $E_{\max a} = 0,3 \frac{2,33 \cdot e^{\frac{1,86 \cdot 10^{-4} \cdot 15 \cdot 10^3}{2}} - 1}{\frac{2,33}{1,08 \cdot 0,55} - 1} = 0,86 \text{ В.}$

5.  $E_{\min k} = \frac{0,86 - 0,3}{2,33} \cdot e^{\frac{1,86 \cdot 10^{-4} \cdot 15 \cdot 10^3}{2}} = 0,06 \text{ В.}$

6.  $a = 0,86 \cdot \left(\frac{1}{1,08} - \frac{1}{2,33}\right) + \frac{0,3}{2,33} = 0,56;$

$$b = 500 \cdot 0,86 \cdot \frac{0,08}{1,08} = 31,85;$$

$$c = 500 \cdot \frac{0,08}{2,33} \cdot (0,86 - 0,3) = 9,61.$$

7.

| $X, \text{м}$ | 200                   | 210                  | 220                   | 230                   | 240                   | 250                   | 260                  |
|---------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| $f(x)$        | $-3,05 \cdot 10^{-3}$ | $-2,3 \cdot 10^{-3}$ | $-1,66 \cdot 10^{-3}$ | $-1,07 \cdot 10^{-3}$ | $-0,53 \cdot 10^{-3}$ | $-0,03 \cdot 10^{-3}$ | $0,43 \cdot 10^{-3}$ |

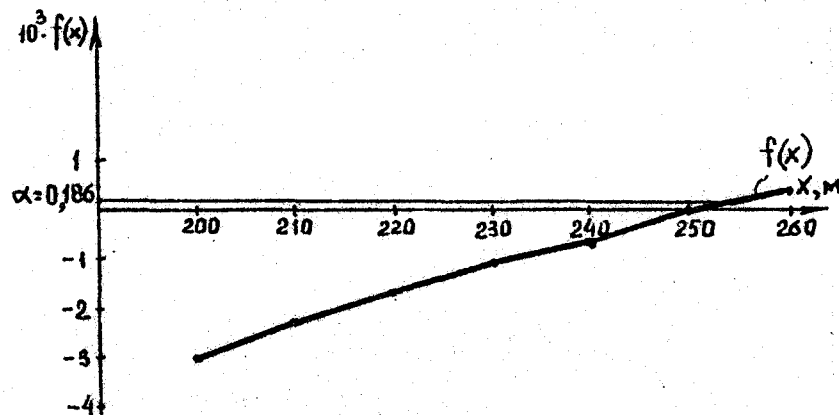


Рис. 9

$$8. E(x)_{x=251,5} = 0,56 \cdot e^{-\frac{1,86 \cdot 10^{-4} \cdot 251,5}{\sqrt{500^2 + 251,5^2}}} + \frac{31,85}{\sqrt{500^2 + 251,5^2}} - \frac{9,61}{\sqrt{30^2 + 251,5^2}} = 0,553$$

$$9. \text{ Сила тока СКЗ } I_{\text{рз}} = \frac{0,86}{0,08 \cdot (1+0,08)} = 9,96 \text{ А.}$$

10. Сила тока автономного источника для создания противопотенциала

$$I_{\text{рк}} = \frac{0,86 - 0,3}{0,08 \cdot (1+2,33)} = 3,01 \text{ А.}$$

## 1.5. Совместная катодная защита подземных металлических сооружений

### 1.5.1. Параллельно уложенные трубопроводы

В случае параллельной укладки нескольких трубопроводов на небольшом расстоянии друг от друга целесообразно осуществлять их совместную защиту, т.е. защиту всех параллельно уложенных трубопроводов на данном участке одной СКЗ.

При совместной защите параллельно уложенных трубопроводов их условно заменяют одним трубопроводом с эквивалентными параметрами, что позволяет выполнять все расчеты по формулам п.п. 1.2-1.3.

Эквивалентные параметры вычисляются по следующим зависимостям:

продольное сопротивление

$$R_{\text{тз}} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{\text{т}i}}{\sum_{i=1}^n R_{\text{т}i}}; \quad (71)$$

сопротивления изоляционного покрытия на единице длины трубопровода

$$R_{\text{изз}} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{\text{из}i} - R_{\text{в}1-2}^2}{\sum_{i=1}^n R_{\text{из}i} - 2 \cdot R_{\text{в}1-2}}; \quad (72)$$

постоянная распределения тока и потенциала

$$\alpha_z = \sqrt{\frac{R_{\text{тз}}}{R_{\text{изз}}}}; \quad (73)$$

где  $R_{\text{т}i}$ ,  $R_{\text{из}i}$  - продольное сопротивление изоляционного покрытия  $i$ -го трубопровода;

$R_{\text{в}i}$  - взаимное сопротивление между двумя рассматриваемыми трубопроводами,

$$R_{\text{в}i} = \frac{\rho_{\text{г}}}{\pi} \ln \frac{1}{b \sqrt{\frac{1}{2} \alpha_i}}; \quad (74)$$

$\alpha_i$  - постоянная распределения  $i$ -го трубопровода;

$b$  - расстояние между трубопроводами.

Если число параллельно уложенных трубопроводов больше двух, то расчет эквивалентных параметров необходимо выполнять по формулам (71)–(72), заменив сначала два трубопровода одним, а затем эквивалентный и третий трубопровод снова заменив одним эквивалентным и т. д.

Для уравнивания длины защитных зон на трубопроводах, объединенных совместной катодной защитой, кроме перемычки, устанавливаемой в точке дренажа, оборудуют дополнительные перемычки на границах общей защитной зоны.

Сечение перемычек выбирают из условия, что падение напряжения на каждой из них не должно превышать 0,02 В. Однако по условиям механической прочности площадь сечения перемычек должна быть не менее 25 мм<sup>2</sup>.

#### ПРИМЕР 17

Рассчитать входное сопротивление и постоянную распределения токов и потенциалов вдоль системы параллельно уложенных трубопроводов, имеющих одинаковое состояние изоляционного покрытия ( $R_{\Pi} = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$ ) и следующие диаметр  $D$  и толщину стенки  $\delta$ :

|                  |                          |                             |
|------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 1-й трубопровод: | $D_1 = 1020 \text{ мм};$ | $\delta_1 = 10 \text{ мм};$ |
| 2-й трубопровод: | $D_2 = 720 \text{ мм};$  | $\delta_2 = 9 \text{ мм};$  |
| 3-й трубопровод: | $D_3 = 529 \text{ мм};$  | $\delta_3 = 8 \text{ мм}.$  |

Трубопроводы уложены в грунт со средним удельным электро-сопротивлением  $\rho_r = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  на расстоянии  $\delta = 10 \text{ м}$  друг от друга.

#### РЕШЕНИЕ

1. По формуле (2) находим продольное сопротивление единицы длины трубопроводов

$$R_{T1} = \frac{0,245}{3,14 (1020-10) \cdot 10} = 9,63 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}.$$

Аналогично находим  $R_{T2} = 12,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}$  и  $R_{T3} = 18,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}$ .

2. Эквивалентное продольное сопротивление 1-го и 2-го трубопроводов по формуле (71)

$$R_{T_{1-2}} = \frac{9,63 \cdot 10^{-6} \cdot 12,2 \cdot 10^{-6}}{9,63 \cdot 10^{-6} + 12,2 \cdot 10^{-6}} = 5,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}.$$

3. Эквивалентное продольное сопротивление всех трех трубопроводов

$$R_{T_{1-2-3}} = \frac{5,3 \cdot 10^{-6} \cdot 18,7 \cdot 10^{-6}}{5,3 \cdot 10^{-6} + 18,7 \cdot 10^{-6}} = 4,13 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}.$$

4. Сопротивление изоляции на единицу длины для каждого трубопровода по формуле (10)

$$R_{из1} = \frac{1000}{3,14 \cdot 1,02} = 313 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

Аналогично находим  $R_{из2} = 442 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  и  $R_{из3} = 600 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

5. Постоянная распределения токов и потенциалов для каждого трубопровода по формуле (13)

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{9,63 \cdot 10^{-6}}{313}} = 1,75 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{м}}.$$

Аналогично находим  $\alpha_2 = 1,66 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{м}}$  и  $\alpha_3 = 1,77 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{м}}$ .

6. Взаимное сопротивление между 1-м и 2-м трубопроводами по формуле (74)

$$R_{B1-2} = \frac{20}{3,14} \ln \frac{1}{10 \sqrt{1,75 \cdot 10^{-4} \cdot 1,66 \cdot 10^{-4}}} = 40 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

7. Эквивалентное сопротивление изоляционного покрытия на единицу длины 1-го и 2-го трубопроводов по формуле (72)

$$R_{из1-2} = \frac{313 \cdot 442 - 40^2}{313 + 442 - 2 \cdot 40} = 181 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

8. Постоянная распределения токов и потенциалов трубопровода, эквивалентного 1-му и 2-му трубопроводам, по формуле (73)

$$\alpha_{1-2} = \sqrt{\frac{5,3 \cdot 10^{-6}}{181}} = 181 \frac{1}{\text{м}}.$$

9. Взаимное сопротивление между эквивалентным трубопроводом (замещающим 1-й и 2-й) и третьим трубопроводом

$$R_{B1-2-3} = \frac{20}{3,14} \ln \frac{1}{10 \sqrt{1,71 \cdot 10^{-4} \cdot 1,77 \cdot 10^{-4}}} = 40,1 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

10. Эквивалентное сопротивление изоляционного покрытия на единицу длины всех трех трубопроводов

$$R_{из1-2-3} = \frac{181 \cdot 600 - 40,1^2}{181 + 600 - 2 \cdot 40,1} = 129 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

II. Постоянная распределения токов и потенциалов (общая для системы трубопроводов)

$$\alpha_{1-2-3} = \sqrt{\frac{4,13 \cdot 10^{-6}}{129}} = 1,79 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{м}}.$$

(II) 12. Входное сопротивление системы нефтепроводов по формуле

$$Z_{1-2-3} = 0,5 \sqrt{4,13 \cdot 10^{-6} \cdot 129} = 1,15 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}.$$

### 1.5.2. Разветвленные коммуникации перекачивающих станций и нефтебаз

При расчете катодной защиты трубопроводов нефтебаз, нефтеперекачивающих, компрессорных и газораспределительных станций необходимо учитывать, что они соединяются с заземленными объектами (резервуары, емкости, трубы котельных, контуры молниезащит, защитные и рабочие заземления). Точки СКЗ от анодного заземления устремляются в основном в мощные контуры заземлений, и только незначительная их часть попадает непосредственно в трубопровод.

В этом случае силу дренажного тока следует определять по формуле

$$I_{\text{др}} = K_1 \cdot K_2 \cdot \frac{R_3 \cdot E_{\text{защ. min}}}{\rho_r}, \quad (75)$$

где  $K_1, K_2$  - коэффициенты, зависящие от количества контуров заземлений и состояния изоляции труб;

$R_3$  - радиус защитной зоны.

Таблица 12

Величина коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$

| Количество контуров заземления | $K_1$ | Переходное сопротивление изоляционного покрытия трубы, Ом·м <sup>2</sup> | $K_2$ |
|--------------------------------|-------|--|-------|
| 1                              | 1     | 50   | 10    |
| 2                              | 1,5   | 80   | 6     |

Продолжение табл. 12

| 1  | 2   | 3     | 4   |
|----|-----|-------|-----|
| 3  | 2   | 100   | 4   |
| 4  | 2,5 | 500   | 2,5 |
| 5  | 3   | 1000  | 2   |
| 6  | 3,5 | 2000  | 1,5 |
| 7  | 4   | 4000  | 1,2 |
| 8  | 5   | 5000  | 1,0 |
| 9  | 7   | 8000  | 0,8 |
| 10 | 10  | 10000 | 0,5 |

Необходимое для обеспечения защиты напряжение на контактах СКЗ определяется по формуле

$$\Delta E = \frac{2 \cdot I_{\text{др}}}{K_1} (R_a + R_{\text{пр}}). \quad (76)$$

#### ПРИМЕР 18

Определить параметры СКЗ для защиты сети подземных трубопроводов нефтебазы в радиусе  $R_3 = 300$  м. Число присоединенных к ним контуров заземления 2, переходное сопротивление изоляции трубопроводов  $R_{\text{п}} = 7000 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ . Другие необходимые данные:  $R_a = 10 \text{ Ом}$ ;  $R_{\text{пр}} = 0,5 \text{ Ом}$ ;  $\rho_r = 30 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

#### РЕШЕНИЕ

1. По табл. 12 находим величину коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$ . Для условий примера  $K_1 = 1,5$ . Величину коэффициента  $K_2$  определяем методом интерполяции:

$$K_2 = 0,8 + (8000 - 7000) \cdot \frac{1,0 - 0,8}{8000 - 5000} = 0,87.$$

2. Вычисляем силу дренажного тока по формуле (75)

$$I_{\text{др}} = 1,5 \cdot 0,87 \cdot \frac{300 \cdot 0,85}{30} = 11,1 \text{ А}.$$

3. Находим напряжение на контактах СКЗ по формуле (76)

$$\Delta E = \frac{2 \cdot 11,1}{1,5} (10 + 0,5) = 155,4 \text{ В}.$$

4. Требуемая мощность СКЗ для обеспечения защиты по формуле (42)

$$P = 11,1 \cdot 155,4 = 1724,9 \text{ Вт}.$$

## 2. ПРОТЕКТОРНАЯ ЗАЩИТА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

### 2.1. Расчет протекторной защиты магистрального трубопровода

Применение протекторов при электрохимической защите магистральных трубопроводов допускается только в групповых установках и грунтах с удельным электросопротивлением не более 50 Ом·м. Принципиальная схема протекторной защиты приведена на рис. 10.

При проектировании протекторной защиты решают как прямую задачу (определение протяженности зоны защиты установки при заданном количестве протекторов), так и обратную (определение необходимого числа протекторов для защиты трубопровода известной длины).

В первом случае длина зоны защиты протекторной установки на изолированном трубопроводе с достаточной для инженерных расчетов точностью определяется по формуле

$$L'_n = \left( \frac{E_n}{E_{\text{защ. min}}} - 1 \right) \cdot \frac{R_{\text{изср}}}{R_n}, \quad (77)$$

где  $E_n$  - потенциал протектора до подключения его к трубопроводу (для магниевых протекторов  $E_n = 1,6$  В по МСЭ);

$R_n$  - сопротивление растеканию тока протекторной установки, определяемое по формуле

$$R_n = \frac{R_{n1}}{N_n \cdot \eta_{\Sigma n}}; \quad (78)$$

$R_{n1}$  - сопротивление растеканию одиночного протектора (определяется по формулам (34), (35);

$N_n$  - число протекторов в группе;

$\eta_{\Sigma n}$  - коэффициент, учитывающий взаимное экранирование протекторов в группе, определяется по формулам (38) - (41) либо - для магниевых протекторов - по рис. 11.

При защите трубопровода одиночными протекторами  $N_n = 1$  и

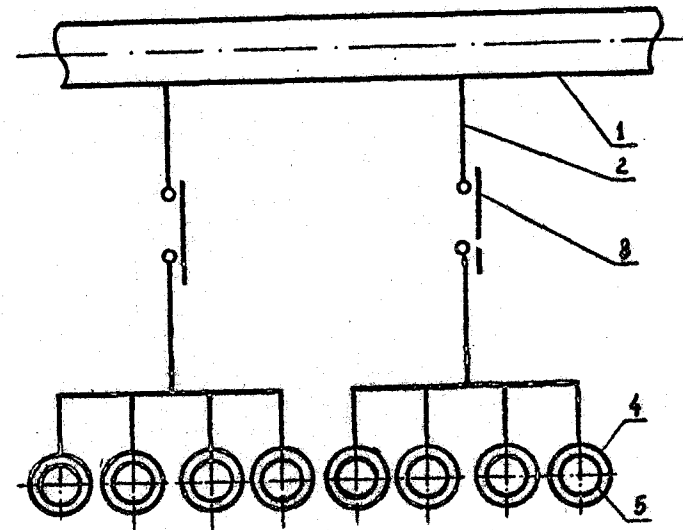


Рис. 10. Схема протекторной защиты магистрального трубопровода:

- 1 - трубопровод;
- 2 - соединительный провод;
- 3 - контрольно-измерительная колонка;
- 4 - активатор;
- 5 - протектор

$$\eta_{\text{эл}} = 1.$$

Сопротивление растеканию тока с одиночного протектора определяется по зависимостям (34), (35). Для магневых протекторов марки ПМУ при их установке на глубине до 2,5 м можно пользоваться упрощенными формулами:

$$R_{\text{П1}}(\text{ПМ5У}) = 0,24 + 0,56 \cdot \rho_{\text{г}};$$

$$R_{\text{П1}}(\text{ПМ10У}) = 0,18 + 0,47 \cdot \rho_{\text{г}}; \quad (79)$$

$$R_{\text{П1}}(\text{ПМ20У}) = 0,15 + 0,40 \cdot \rho_{\text{г}}.$$

В случае, если применяются протекторы без активатора, в формулы (34), (35) вместо размеров столба активатора необходимо подставлять размеры протектора.

Таблица 13

Техническая характеристика магневых протекторов

| Тип протектора | Размеры протектора, мм |                |                |                | Масса*<br>G, кг |
|----------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|                | L <sub>п</sub>         | d <sub>п</sub> | L <sub>а</sub> | d <sub>а</sub> |                 |
| ПМ5            | 500                    | 95             | -              | -              | 5               |
| ПМ5У           | 500                    | 95             | 580            | 165            | 16              |
| ПМ10           | 600                    | 125            | -              | -              | 10              |
| ПМ10У          | 600                    | 123            | 700            | 200            | 30              |
| ПМ20           | 800                    | 181            | -              | -              | 20              |
| ПМ20У          | 900                    | 181            | 900            | 240            | 60              |

\* Масса протекторов ПМ5, ПМ10У, ПМ20У включает массу активатора.

Сила тока в цепи протекторной установки при подключении её к трубопроводу определяется по зависимости

$$I_{\text{п}} = \frac{E_{\text{т.п}}}{R_{\text{п}}} \left( 1 - \frac{E_{\text{заш.т.п.п}}}{E_{\text{п}}} \right) \quad (80)$$

Срок службы протекторной установки вычисляется по формуле

$$T = 0,45 \frac{G_{\text{п}} \cdot N_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{и}} \cdot \eta_{\text{п}}}{I_{\text{п}} \cdot Q_{\text{п}}}, \quad (81)$$

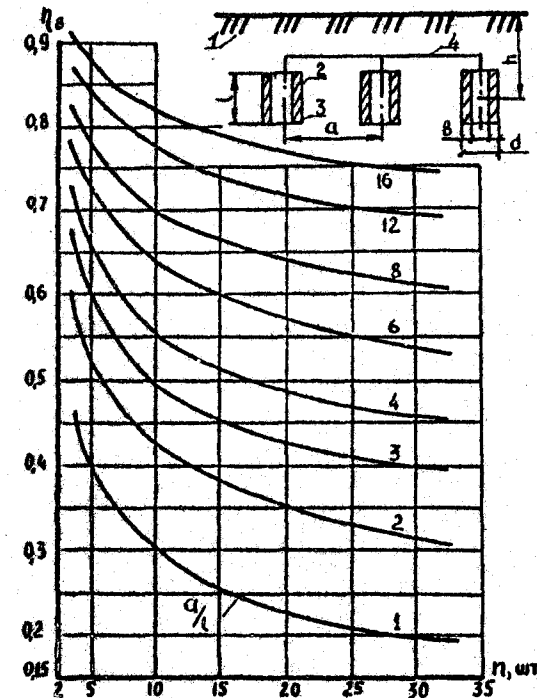


Рис. II. Зависимость коэффициента экранирования вертикальных протекторов типа ПМ-10у от их числа при различных отношениях  $a/l$ :

- 1 - поверхность земли;
- 2 - активатор;
- 3 - протектор;
- 4 - соединительный провод



где  $\eta_n$  - коэффициент использования протектора ( $\eta_n = 0,95$ );  
 $\eta_n$  - к п д протектора, определяет в зависимости от  
 анодной плотности тока  $j_a$  по графику на рис. 12;  
 $q_n$  - электрохимический эквивалент материала протектора  
 (для магниевых протекторов  $q_n = 3,95$  кг/А·год).  
 Анодная плотность тока определяется по формуле

$$j_a = \frac{10 \cdot I_n}{N_n \cdot d_n \cdot (\pi L_n + 1,57 d_n)}, \frac{\text{мА}}{\text{см}^2} \quad (82)$$

При решении обратной задачи число протекторов в группе, необходимых для защиты участка трубопровода длиной  $L_n$ , определяется как отношение величины необходимого защитного тока  $I$  к токоотдаче одного протектора  $I_{n1}$  (увеличение в 1,5...2 раза), т. е.

$$N_n = (1,5 \div 2) \frac{I}{I_{n1}} \quad (83)$$

Величина необходимого защитного тока определяется из условия создания на трубопроводе наложенной разности потенциалов на ниже минимальной:

$$I = K l_n^* \frac{E_{\min}}{R_{\text{из ср}}}, \quad (84)$$

где  $K$  - коэффициент, учитывающий неравномерность распределения разности потенциалов "труба-земля" вдоль трубопровода ( $K = 1,2 \dots 1,3$ );

$l_n^*$  - протяженность участка трубопровода, защиту которого необходимо обеспечить.

Токоотдача одного магниевого протектора рассчитывается по формуле

$$I_{n1} \approx \frac{0,6}{R_{n1}} \quad (85)$$

#### ПРИМЕР 19

Определить протяженность защитной зоны и срок службы одной протекторной установки, состоящей из пяти вертикально установленных протекторов марки ПМБУ. Глубина установки протекторов  $h_n = 2$  м, расстояние между ними в группе  $\alpha = 5$  м. Другие

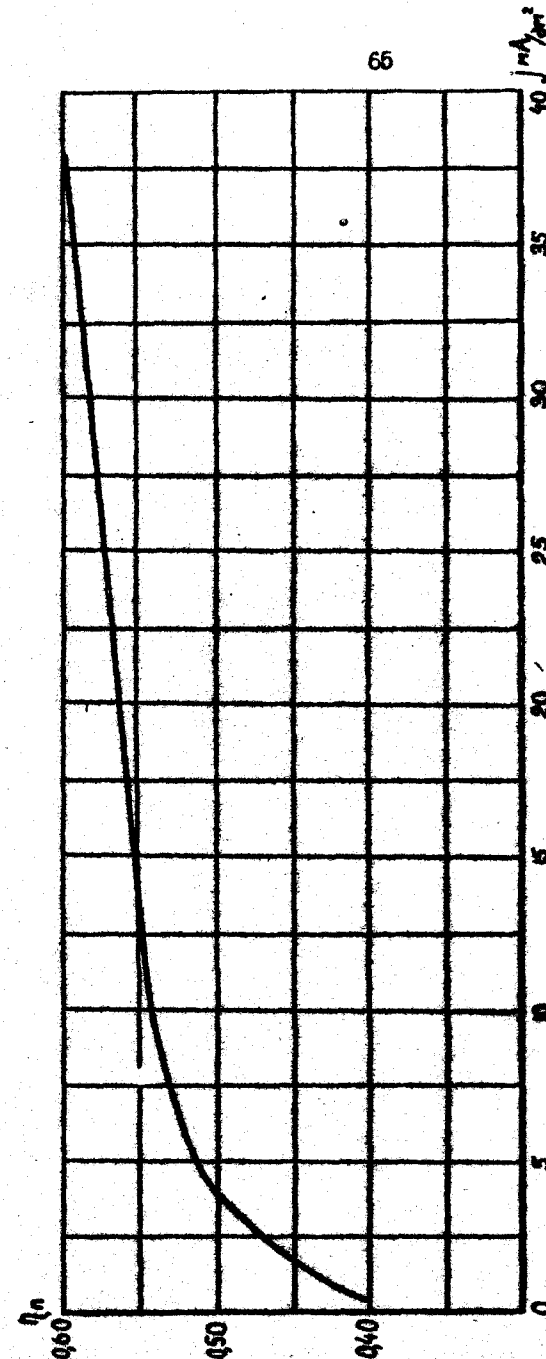


Рис. 12. Зависимость коэффициента полезного действия магниевых протекторов от анодной плотности тока

данные, необходимые для расчета, следующие:  $R_p = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $R_{из.ср.} = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  
 $S_a = 0,2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

#### РЕШЕНИЕ

1. Для протекторов марки ПМБУ  $l_n = 0,5 \text{ м}$ ;  $d_n = 0,095 \text{ м}$ ;  
 $l_a = 0,58 \text{ м}$ ;  $d_a = 0,165 \text{ м}$ ;  $G_n = 20 \text{ кг}$  (табл. 13).
2. Вычисляем сопротивление растеканию одиночного протектора по формуле (34):

$$R_{п1} = \frac{20}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,58} \cdot \left( l_n \frac{2 \cdot 0,58}{0,165} + \frac{1}{2} l_n \frac{4 \cdot 2 - 0,58}{4 \cdot 2 + 0,58} + \frac{0,2}{20} l_n \frac{0,165}{0,095} \right) = 10,34 \text{ Ом}.$$

3. По графику на рис. II для заданного количества протекторов и отношения  $Q/l_n = 10$  находим величину коэффициента экранирования  $\eta_{эп} = 0,82$ .

4. Находим сопротивление растеканию тока с протекторной установки по формуле (78):

$$R_n = \frac{10,34}{5 \cdot 0,82} = 2,52 \text{ Ом}.$$

5. Определяем протяженность защитной зоны протекторной установки по формуле (77):

$$l'_n = \frac{500}{2,52} \cdot \left( \frac{1,6}{0,85} - 1 \right) = 175,4 \text{ м}.$$

6. Сила тока протекторной установки по формуле (80)

$$I_n = \frac{0,3}{2,52} \left( 1 - \frac{0,85}{1,6} \right) = 0,06 \text{ А}.$$

7. Анодная плотность тока по формуле (82)

$$j_a = \frac{10 \cdot 0,06}{5 \cdot 0,095 \cdot (3,14 \cdot 0,5 + 1,57 \cdot 0,095)} = 7,3 \frac{\text{мА}}{\text{см}^2}.$$

8. По графику на рис. I2 находим  $k$  и  $d$  протекторной установки  $\eta_n = 0,52$ .

9. Срок службы протекторной установки по формуле (81)

$$T = 0,45 \cdot \frac{5 \cdot 5 \cdot 0,95 \cdot 0,52}{0,06 \cdot 3,95} = 23,5 \text{ год}.$$

#### ПРИМЕР 20

Определить, какое количество магниевых протекторов марки

ПМ10У потребуется для обеспечения защиты участка трубопровода длиной 10000 м, если известно, что  $R_{из.ср} = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $R_r = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

#### РЕШЕНИЕ

1. Сопротивление расстоянию с одиночного протектора по формуле (79)

$$R_{п1} = 0,18 + 0,47 \cdot 10 = 4,88 \text{ Ом}.$$

2. Токоотдача одного магниевго протектора по формуле (85)

$$I_{п1} = \frac{0,6}{4,88} = 0,123 \text{ А}.$$

3. Необходимая величина защитного тока по формуле (84)

$$I = 1,25 \cdot 10000 \cdot \frac{0,3}{1000} = 3,75 \text{ А}.$$

4. Требуемое количество протекторов по формуле (83)

$$N_n = 1,75 \cdot \frac{3,75}{0,123} = 53,4.$$

5. Округляем полученное число протекторов до ближайшего большего целого числа. Получаем  $N_n = 54$  шт.

#### 2.2. Расчет протекторной защиты резервуаров

Протекторная защита может осуществляться как одиночными протекторами, равномерно распределенными вблизи защищаемой поверхности (одиночные протекторные установки), так и групповыми протекторными установками (рис. 13).

Одиночные протекторные установки применяются для резервуаров, площадь дна которых не превышает  $200 \text{ м}^2$  (резервуары до РС-2000 включительно). При большой площади дна применяют групповые протекторные установки.

##### 2.2.1. Расчет защиты дна резервуара типа РС одиночными протекторными установками

Задачей расчета является определение необходимого для защиты числа протекторов и срока их службы.

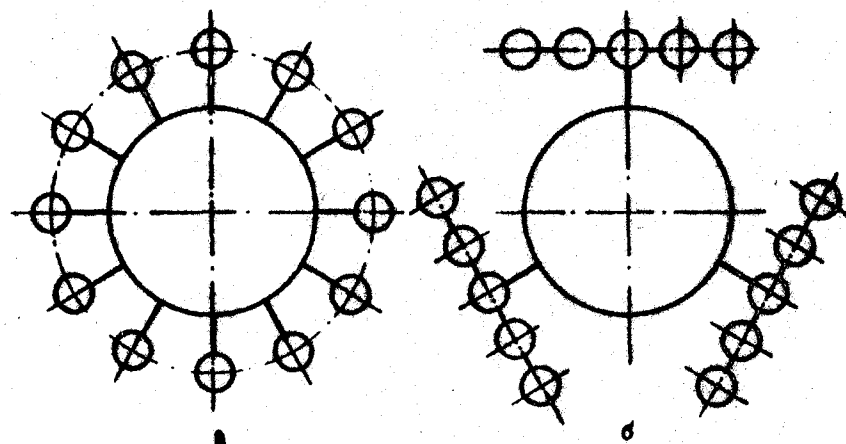


Рис.13. Защита дна резервуара типа РВС от почвенной коррозии с помощью протекторов:

- а - одимочными протекторами;  
б - групповыми протекторными установками

Количество протекторов должно быть таким, чтобы обеспечить минимально допустимую плотность защитного тока  $j_n$ , определяемую в зависимости от удельного электросопротивления грунта и переходного сопротивления изоляции

$$R_o = R_{pr} \cdot F_p, \quad (86)$$

где  $R_{pr}$  - сопротивление на границе "резервуар-грунт", определяемое либо непосредственно с помощью измерителя заземления типа МС-03, либо по приближенной формуле

$$R_{pr} = \frac{3 \rho_r}{D_p (D_p + B)}, \quad (87)$$

$F_p$  - площадь дна резервуара диаметром  $D_p$ ;

$B$  - расстояние между протектором и резервуаром (выбирается, исходя из местных условий, в пределах 5-10 м).

Необходимая величина защитного тока составляет

$$I_z = j_n F_p. \quad (88)$$

Резервуар будет полностью защищен от коррозии, если выполняется неравенство

$$I_z R_{pr} \geq |E_n - E_{см}|. \quad (89)$$

Таблица 14

Защитная плотность тока для изолированного стального сооружения

| Переходное сопротивление изоляции, Ом·м <sup>2</sup> | Удельное электросопротивление грунта, Ом·м |           |           |
|--|--|-----------|-----------|
|  | 10   | 20        | 50        |
| Более 10000  | Менее 1,0                                  | Менее 0,4 | Менее 0,2 |
| 1000-10000   | 1,0-2,0                                    | 0,4-1,0   | 0,2-0,5   |
| 100-1000   | 2,0-5,0                                    | 1,0-2,0   | 0,5-1,0   |
| 10-100   | 5,0-15,0                                   | 2,0-5,0   | 1,0-2,0   |
| Менее 10   | Более 15,0                                 | Более 5,0 | Более 2,0 |

Примечание. Большому значению переходного сопротивления  $R_0$  соответствует меньшее значение  $I_n$ .

При применении магневых протекторов условие полной защиты  $I_3 R_{pr} \geq I_B$ .

Если условие (89) не выполняется, то полная защита резервуара от коррозии с помощью протекторов не может быть осуществлена.

Ориентировочное число протекторов определяется по формуле

$$N_{по} = \frac{R_{нл}}{E_n - E_{есл} - R_{pr}} \quad (90)$$

Окончательное число протекторов, необходимых для защиты резервуара,

$$N_n = \frac{N_{по}}{\eta_{эн}} \quad (91)$$

Коэффициент экранирования  $\eta_{эн}$  в этой формуле определяется так же, как и в формуле (78). Для вертикально установленных протекторов марки ПМ10У, установленных на расстоянии 5 м от стенки резервуара, величины коэффициентов  $\eta_{эн}$  могут быть взяты из табл. 15.

Таблица 15

Зависимость коэффициента экранирования вертикальных упакованных протекторов  $\eta_{эн}$  от их числа

| Тип резервуара | Величина при числе протекторов |      |      |      |      |  |
|----------------|--------------------------------|------|------|------|------|--|
|                | 10                             | 15   | 20   | 25   | 30   |  |
| РВС-5000       | 0,82                           | 0,70 | 0,64 | 0,57 | 0,50 |  |
| РВС-10000      | 0,87                           | 0,73 | 0,71 | 0,65 | 0,59 |  |
| РВС-20000      | 0,90                           | 0,83 | 0,76 | 0,70 | 0,65 |  |

Срок службы протекторов определяется по формуле (81), в которую подставляют величину силы тока протектора

$$I_n = \frac{E_n - E_{есл}}{R_{pr} + R_{нл}} \quad (92)$$

### ПРИМЕР 21

Определить количество одиночных протекторов типа ПМ-10У, необходимых для обеспечения защиты резервуара РВС-2000 ( $D_p = 15,0$  м), установленного на площадке с увлажненным песком ( $R_{pr} = 20$  Ом·м). Расстояние от резервуара до протектора пять метров.

### РЕШЕНИЕ

1. Площадь дна резервуара

$$F_p = \frac{3,14 \cdot 15^2}{4} = 176,6 \text{ м}^2.$$

2. Сопротивление "резервуар-грунт" по формуле (87)

$$R_{pr} = \frac{3 \cdot 20}{15 \cdot (15 + 5)} = 0,2 \text{ Ом}.$$

3. Переходное сопротивление изоляции дна резервуара по формуле (86)

$$R_0 = 0,2 \cdot 176,6 = 35,3 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2.$$

4. По табл. 14 принимаем величину защитной плотности тока, соответствующую  $R_{pr} = 20$  Ом·м и  $R_0 = 35,3$  Ом·м,  $I_n = 0,0035$  А/м<sup>2</sup>.

5. Сила тока, необходимая для защиты дна резервуара от коррозии,

$$I_3 = 0,0035 \cdot 176,6 = 0,62 \text{ А}.$$

6. Выполним проверку условия (89):

$$I_3 R_{pr} = 0,62 \cdot 0,2 = 0,124 < 1.$$

Следовательно, возможна полная защита резервуара магнeвыми протекторами.

7. Сопротивление растеканию тока с протектора по формуле (79)

$$R_{нл} = 0,18 + 0,47 \cdot 20 = 9,58 \text{ Ом}.$$

8. Ориентировочное число протекторов по формуле (90)

$$N_{по} = \frac{9,58}{\frac{1,6 - 0,55}{0,62} - 0,2} = 6,4$$

Округляем данное количество до  $N_{по} = 7$ .

9. Для ориентировочного количества протекторов по табл. IБ находим коэффициент экранирования  $\eta_{эп} = 0,82$ .

10. Окончательное число протекторов по формуле (91)

$$N_n = \frac{7}{0,82} = 8,54 \approx 9$$

II. Анодная плотность тока по формуле (82)

$$j_a = \frac{10 \cdot 0,62}{9 \cdot 0,123 \cdot (3,14 \cdot 0,6 + 1,57 \cdot 0,123)} = 2,7 \frac{\text{мА}}{\text{см}^2}$$

12. По графику рис. 12 находим к п д протектора  $\eta_n = 0,58$ .

13. Сила тока протектора по формуле (92)

$$I_{n1} = \frac{1,6 - 0,55}{0,2 + 9,58} = 0,11 \text{ А.}$$

14. Срок службы протекторов по формуле (81)

$$T = \frac{9 \cdot 0,58 \cdot 0,95 \cdot 0,45}{0,11 \cdot 3,95} = 5,1 \text{ лет.}$$

### 2.2.2. Расчет защиты днища резервуара типа РВС групповыми протекторными установками

В данном случае определение числа протекторов, необходимых для защиты, производится методом последовательных приближений. Сначала находят ориентировочное количество протекторов во всех группах с учетом эффекта экранирования по формуле

$$N_{по} = 1,4 \frac{I_3}{I_{n1}} \quad (93)$$

Расчетную величину  $N_{по}$  округляют до ближайшего целого числа  $N'_{по}$ . Затем, задав ориентировочное количество протекторов в одной группе  $N_1$ , находят число групповых протекторных установок по зависимости

$$n = \frac{N'_{по}}{N_1} \quad (94)$$

Пользуясь формулой (78) и понимая под  $N_n$  величину  $N_1$ , вычисляют сопротивление растеканию тока с групповой протекторной установки  $R_{nr}$ . Тогда сила тока групповой протекторной установки составит

$$I_{nr} = \frac{E_n - E_{зем}}{R_{nr} + R_{pr}} \quad (95)$$

Уточненное количество протекторов в группе определяется по формуле

$$N_k = \frac{N_1}{n} \cdot \frac{I_3}{I_{nr}} \quad (96)$$

Если уточненное количество протекторов в группе отличается от первоначально принятого более чем на 15 %, то весь расчет необходимо повторить, задав  $N_1 = N_k$ .

Причем протекторы во избежание повреждения изоляционного покрытия солями растворяющегося протектора должны располагаться на расстоянии

$$y > \frac{I_{nr} R_{pr}}{2\pi(E'_{max} - I_{nr} R_{pr})} \gg 3 \text{ м}, \quad (97)$$

где  $E'_{max}$  — максимальная наложенная разность потенциалов (для магниевых протекторов  $E'_{max} = 1,15 \text{ В}$ ).

### ПРИМЕР 22

Определить параметры протекторной защиты резервуара РВС-2000 с помощью групповых установок. Исходные данные и промежуточные результаты взять из примера 21.

### РЕШЕНИЕ

1. Ориентировочное общее количество протекторов, необходимое для защиты, по формуле (93)

$$N_{по} = 1,4 \frac{0,62}{0,11} = 7,9 \approx 8$$

2. Принимаем  $N_1 = 4$ . Отсюда число групповых протекторных установок  $n = 2$ .

3. Сопротивление растеканию тока с групповой установкой по формуле (78)  $R_{nr} = \frac{9,58}{4 \cdot 0,82} = 2,9 \text{ Ом.}$

4. Сила тока групповой протекторной установки по формуле (96)

$$I_{\text{гр}} = \frac{1,6 - 0,55}{2,9 + 0,2} = 0,34 \text{ А}.$$

5. Уточненное количество протекторов в группе по формуле (96)

$$N_K = \frac{4}{2} \cdot \frac{0,62}{0,34} = 3,65.$$

6. Отклонение уточненного количества протекторов от первоначального принятого

$$\frac{N_K - N_1}{N_1} \cdot 100 = \frac{3,65 - 4}{4} \cdot 100 = 7,5\% < 15\%.$$

Следовательно, выбор числа протекторов сделан правильно.

7. Безопасное удаление протекторов от резервуара по формуле (97)

$$Y = \frac{0,34 \cdot 20}{2 \cdot 3,14 \cdot (1,15 - 0,34 \cdot 0,2)} = 1 \text{ м} < 3 \text{ м}.$$

Таким образом, групповые протекторные установки могут быть расположены на расстоянии трех метров от резервуара.

8. Срок службы протекторов по формуле (81)

$$T = \frac{8 \cdot 10 \cdot 0,6 \cdot 0,95 \cdot 0,45}{3,95 \cdot 0,62} = 8,4 \text{ лет}.$$

- 2.2.3. Расчет защиты внутренней поверхности резервуаров от коррозии при контакте с подтоварной водой

Нефть, поступающая в резервуарные парки головных сооружений нефтепроводов, в той или иной степени содержит воду в видестойкой эмульсии, в которой присутствует значительное количество хлоридов магния, натрия, кальция и железа.

При отстаивании нефти и разрушении эмульсии вода с растворенными в ней солями собирается на дне резервуара и вызывает усиленную электрохимическую коррозию днища и нижних поясов.

Защита днищ и нижних поясов резервуаров электрохимическим методом может осуществляться с применением катодных станций либо протекторов. Применение протекторов по противопожарным

соображениям является более предпочтительным.

Защищенность внутренней поверхности резервуаров при протекторной защите можно контролировать по разности потенциалов "резервуар-подтоварная вода". Защита считается обеспеченной, если разность потенциалов  $|E_{\text{защ}}| \geq |-0,85 \text{ В}|$  по МСЭ.

От величины удельного электросопротивления подтоварной воды зависят сопротивление растеканию, сила тока, срок службы протекторной установки. В свою очередь, величина  $\rho_B$  вычисляется в зависимости от количества растворенных в подтоварной воде солей

$$\rho_B = \frac{1}{1,5 + K}, \quad (98)$$

где  $K$  - концентрация солей в подтоварной воде, %.

Ток протектора определяется из выражения

$$I_{\text{III}} = \frac{|E_n| - |E_{\text{ест}}|}{R_p + R_n + R_d}, \quad (99)$$

где  $E_{\text{ест}}$  - естественный потенциал материала резервуара;

$E_n$  - потенциал протектора;

$R_p$  - сопротивление протектора растеканию тока;

$R_n$  - поляризационное сопротивление протектора;

$R_d$  - переходное сопротивление "подтоварная вода-днище".

Так как в практических условиях  $R_d \ll R_p + R_n$ , то формулу (99) можно упростить:

$$I_{\text{III}} = \frac{|E_n| - |E_{\text{ест}}|}{R_p + R_n}. \quad (100)$$

Сопротивление растеканию тока с протектора  $R_p$  в электролите зависит не только от удельного электросопротивления подтоварной воды, но и от геометрических размеров самого протектора.

Для цилиндрического протектора длиной  $L_n$  и диаметром  $D_n$  при условии  $L_n \gg D_n$

$$R_p = \frac{\rho_B}{2\pi L_n} \cdot L_n \cdot \frac{4 \cdot \pi}{D_n}. \quad (101)$$

Для цилиндрического протектора при  $D_n \gg L_n$

$$R_p = \frac{P_B}{4 D_n} \quad (102)$$

Поляризационное сопротивление протектора

$$R_n = \frac{R_n^0}{S_n} = \frac{1}{S_n \cdot (1,26 + K)} \quad (103)$$

где  $S_n$  - площадь поверхности контакта протектора с электролитом,

$$S_n = \pi \cdot D_n \cdot \left( \frac{D_n}{4} + L_n \right); \quad (104)$$

$R_n^0$  - удельное поляризационное сопротивление протектора, Ом·м<sup>2</sup>,

$$R_n^0 = \frac{1}{1,26 + K} \quad (105)$$

Необходимое для защиты днища и первого пояса резервуара число протекторов  $N_3$  зависит от токоотдачи одного протектора  $I_{n1}$ , площади защищаемой поверхности  $F_3$  и необходимой плотности защитного тока  $j_3$ :

$$N_3 = 1,3 \cdot \frac{j_3 F_3}{I_{n1}} \quad (106)$$

При наличии катодного осадка на днище резервуара необходимая плотность защитного тока составляет  $j_3 = 5 \dots 20$  мА/м<sup>2</sup>. В остальных случаях она принимается согласно табл. 14.

Площадь защищаемой поверхности вычисляется по формуле

$$F_3 = \pi D_p \left( \frac{D_p}{4} + B_n \right) \quad (107)$$

где  $D_p$  - диаметр резервуара;

$B_n$  - высота залива подтоварной воды.

Токоотдача одного протектора вычисляется по формуле (92).

Срок службы протекторов определяется по формуле (81).

#### ПРИМЕР 23

Рассчитать протекторную защиту внутренней поверхности

резервуара РВС-5000 от коррозии подтоварной водой с концентрацией солей 10 %. Уровень подтоварной воды 1 м.

#### РЕШЕНИЕ

1. Удельное электросопротивление подтоварной воды по формуле (98)

$$\rho_B = \frac{1}{1,5 + 10} = 0,087 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

2. Выбираем протектор типа ПМР-20 с параметрами  $G_n = 20$  кг;  $L_n = 0,14$  м;  $d_n = 0,4$  м.

3. Сопротивление растеканию тока с протектора по формуле (101)

$$R_p = \frac{0,087}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,14} L_n \frac{4 \cdot 0,14}{0,4} = 3,33 \text{ Ом}.$$

4. Площадь поверхности контакта протектора с электролитом по формуле (104)

$$S_n = 3,14 \cdot 0,4 \cdot \left( \frac{0,4}{4} + 0,14 \right) = 0,3 \text{ м}^2.$$

5. Поляризационное сопротивление протектора по формуле (103)

$$R_n = \frac{1}{0,3 \cdot (1,26 + 10)} = 0,3 \text{ Ом}.$$

6. Токоотдача протектора по формуле (92)

$$I_{n1} = \frac{1,05}{3,33 + 0,3} = 0,3 \text{ А}.$$

7. Площадь защищаемой поверхности резервуара по формуле (107)

$$F_3 = 3,14 \cdot 22,79 \cdot \left( \frac{22,79}{4} + 1 \right) = 479,3 \text{ м}^2.$$

8. Необходимое число протекторов по формуле (106)

$$N_3 = 1,3 \cdot \frac{0,02 \cdot 479,3}{0,3} = 41,5.$$

Округляем найденное количество в большую сторону  $N_{ок} = 42$  шт.

9. Анодная плотность тока по формуле (82)

$$j_a = \frac{10 \cdot 0,3}{42 \cdot 0,4 \cdot (3,14 \cdot 0,14 + 1,57 \cdot 0,4)} = 8,89 \frac{\text{мА}}{\text{см}^2}.$$

Данной плотности тока соответствует к п д протектора

$$\eta_n = 0,54.$$

10. Срок службы протектора по формуле (81)

$$T = 0,45 \frac{20 \cdot 0,54 \cdot 0,95}{3,95 \cdot 0,3} = 3,9 \text{ лет.}$$

### 3. ЭЛЕКТРОДРЕНАЖНАЯ ЗАЩИТА ОТ БЛУДАЩИХ ТОКОВ

Большую опасность для подземных трубопроводов представляют блуждающие токи. Наиболее эффективным способом защиты от них является электродренажная защита. При ее расчете решаются две основные задачи: выбирается место ее установки и определяется сечение дренажного кабеля.

1. Место установки электродренажной защиты определяется коррозионными изысканиями на местности.

2. Площадь сечения дренажного кабеля определяется по формуле

$$S_k = \frac{I_d}{\Delta U_d} \rho_k l_k \quad (108)$$

где  $S_k$  - площадь сечения дренажного кабеля, мм;  
 $I_d$  - максимальная сила тока в дренажной цепи, А;  
 $\Delta U_d$  - допустимое падение напряжения в дренажной цепи;  
 $l_k$  - длина дренажного кабеля, м;  
 $\rho_k$  - удельное сопротивление материала дренажного кабеля,  $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ .

Максимальную силу тока в дренажной цепи определяют по формуле

$$I_d = 0,2 I_m \cdot n \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5, \quad (109)$$

где  $I_d$  - сила тока в дренажной линии, А;  
 $I_m$  - ток нагрузки тяговой подстанции;  
 $K_1$  - коэффициент, учитывающий расстояние до электрофицированной железной дороги;  
 $K_2$  - коэффициент, учитывающий расстояние до тяговой подстанции;  
 $K_3$  - коэффициент, учитывающий состояние изоляционного покрытия;  
 $K_4$  - коэффициент, учитывающий возраст подземного сооруже-

ния;

$K_5$  - коэффициент, учитывающий число параллельно уложенных трубопроводов.

Проверка правильности сечения дренажного кабеля производится по допустимой плотности тока  $j_{доп}$ , которая для медного кабеля равна  $1 \text{ А/мм}^2$ , а для алюминиевого равна  $0,8 \text{ А/мм}^2$ .

$$j = \frac{I_d}{S_k} < j_{доп} \quad (110)$$

Таблица 13

Значение коэффициента  $K_1$

| Расстояние до электрофицированной железной дороги (не более), м | $K_1$ |
|---|-------|
| 100   | 1     |
| 200   | 0,95  |
| 300   | 0,9   |
| 500   | 0,75  |
| 800   | 0,65  |
| 1000  | 0,55  |
| 1500  | 0,35  |
| 2000  | 0,25  |
| 3000  | 0,15  |

Таблица 14

Значение коэффициента  $K_2$

| Расстояние до тяговой подстанции (не более), м | $K_2$ |
|--|-------|
| 100  | 1     |
| 500  | 0,75  |
| 1000   | 0,4   |
| 2000   | 0,25  |
| 3000   | 0,15  |
| 6000   | 0,1   |



Таблица 15

Значение коэффициента  $K_3$ 

| Состояние изоляционного покрытия | $K_3$ |
|----------------------------------|-------|
| Нормальное                       | I     |
| Усиленное                        | 0,9   |
| Весьма усиленное                 | 0,6   |

Таблица 16

Значение коэффициента  $K_4$ 

| Возраст трубопровода | $K_4$ |
|----------------------|-------|
| Более пяти лет       | I     |
| Через три года       | 0,9   |
| Через шесть месяцев  | 0,75  |

Таблица 17

Значение коэффициента  $K_5$ 

| Число параллельных трубопроводов | $K_5$ |
|----------------------------------|-------|
| 1                                | 0,8   |
| 2                                | 0,9   |
| 3                                | 0,95  |
| 4 и более                        | I     |

Таблица 18

Величина  $\Delta U_d$  при подключении дренажа к минусовой шине тяговой подстанции

| Расстояние между отсасывающим пунктом и трубопроводом, м | $\Delta U_d, B$ |
|--|-----------------|
| 200  | 10              |
| 500  | 11              |
| 1000   | 12              |
| 2000   | 13              |
| 3000   | 14              |

Таблица 19

Величина  $\Delta U_d$  при подключении дренажа через среднюю точку путевых дросселей

| Расстояние между трубопроводом и железной дорогой, м | $\Delta U_d, B$ |
|--|-----------------|
| 500  | 3               |
| 1000   | 5               |
| 2000   | 6               |
| 3000   | 7               |

## ПРИМЕР 24

Подобрать кабель для электродренажной установки нефтепровода  $\varnothing 820$  мм, уложенного в грунт на расстоянии 500 м от железнодорожного полотна. Срок службы дренажной установки 8 лет, максимальные токи тяговой подстанции 600 А.

## РЕШЕНИЕ

1. Для сооружения электродренажной линии выбираем алюминиевый кабель с удельным электросопротивлением

$$\rho_{\text{пр}} = 0,029 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

2. При подключении дренажа к минусовой шине тяговой подстанции

$$\Delta U_d = 11 B \text{ (табл. 18)}.$$

3. Согласно условию задачи из табл. 13-18 выбираем значения коэффициентов:

$$\begin{aligned} K_1 &= 0,75 \\ K_2 &= 0,75 \\ K_3 &= 0,9 \\ K_4 &= I \\ K_5 &= I. \end{aligned}$$

4. Определяем максимальную силу тока в дренажной цепи по формуле (109):

$$I_d = 0,2 I_{\text{тп}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 = 0,2 \cdot 600 \cdot 0,75 \cdot 0,75 \cdot 0,9 \cdot I \cdot I = 60,75 A.$$

5. Определяем необходимое сечение дренажного провода по формуле (108):

$$S_k = \frac{I_d}{\Delta U_d} \cdot \rho_k \cdot L_k = \frac{6075}{11} \cdot 0,029 \cdot 500 = 80,08 \text{ мм}^2$$

6. Выбираем кабель марки А-95, имеющий фактическое сечение 94,9 мм<sup>2</sup> (приложение 4).

7. Проверяем правильность подбора кабеля по формуле (110):

$$j = \frac{I_d}{S_k} = \frac{60,75}{94,9} = 0,64 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2} < 0,8 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

#### 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ БОРЬБЫ С ВНУТРЕННЕЙ КОРРОЗИЕЙ НЕФТЕПРОВОДОВ

Нефтепроводы подвержены не только внешней коррозии, но и внутренней. Коррозионные повреждения в результате внутренней коррозии возникают, в частности, в местах длительного контакта с водой или коррозионно активными компонентами нефтяного газа (СО<sub>2</sub>, Н<sub>2</sub>С): в местах расположения скоплений газа или воды, а также при раздельной структуре газоводонефтяного потока в промысловых трубопроводах.

Предупредить внутреннюю коррозию можно, если перевести коррозионно активную среду внутрь нефти, т.е. обеспечить эмульсионную структуру потока.

Условие существования эмульсионной структуры водонефтяного потока имеет вид [14]

$$K_B \geq \frac{0,86 \cdot W_{eB}^{0,05} \cdot Re^{0,28}}{[(1-\beta_2)(1-0,863\beta_B M^{0,15})]^{0,2}} \quad (110)$$

где  $K_B, W_{eB}, Re$  - числа соответственно Кутателадзе, Вебера и Рейнольдса, вычисленные по приведенной скорости нефти:

$$K_B = \frac{\omega \cdot \sqrt{\rho_B}}{\sqrt[4]{g \sigma_{HB} (\rho_B - \rho_H)}}; W_{eB} = \frac{\sigma_{HB}}{\rho_H \cdot D \cdot \omega^2}; Re = \frac{\omega \cdot D}{\nu_H} \quad (111)$$

где  $\omega$  - приведенная скорость нефти,  $\omega = 4 Q_H / (\pi D^2)$ ;

$\rho_B, \rho_H$  - плотность соответственно воды и нефти;

$\sigma_{HB}$  - поверхностное натяжение на границе воды и нефти;

$\nu_H$  - кинематическая вязкость нефти;

$\beta_B$  - расходное водосодержание,  $\beta_B = Q_B / (Q_H + Q_B)$ ;

$Q_B, Q_H$  - расход соответственно воды и нефти;

$M$  - параметр, определяемый по формуле  $M = \nu_H^5 \cdot \rho_H^4 \cdot \omega^3 / (D \cdot \sigma_{HB}^4)$ ;

Условие существования эмульсионной структуры газонефтяного потока таково [15]:

$$K_r \geq \frac{0,49 (0,2 + 9,25 \cdot 10^{-2} F_z^{0,7})^{0,37}}{W_e^{0,03} \cdot \varphi^{0,05} \cdot \rho^{0,08} \cdot \lambda^{0,15} (1+\varphi)^{0,69} \cdot \cos^{0,25} \alpha} \cdot \left( \frac{Re}{1-\beta_r} \right)^{0,25} \quad (112)$$

где  $K_r$  - число Кутателадзе при перекачке газонефтяной смеси,

$$K_r = \frac{\omega \sqrt{\rho_H}}{\sqrt[4]{g \sigma_{Hr} (\rho_H - \rho_r)}}; \quad (113)$$

$\sigma_{Hr}$  - поверхностное натяжение на границе нефть-газ;

$F_z$  - число Фруда, рассчитанное по приведенной скорости нефти,

$$F_z = \frac{\omega^2}{g D}; W_e = \frac{\sigma_{Hr}}{\rho_H D \omega^2}; \quad (114)$$

$\varphi$  - истинное газосодержание, равное  $\varphi = c \cdot \beta$ ;

$\beta$  - расходное газосодержание,  $\beta = Q_r / (Q_r + Q_H)$ ;

$Q_r$  - расход газа;

$c$  - коэффициент,

$$c = \begin{cases} 0,81 [1 - \exp(-2,2 \sqrt{F_{zcm}})] & \text{при } F_{zcm} \leq 4; \nu_H \leq 1 \frac{\text{мм}^2}{\text{с}}; \\ [0,83 - 0,095 \lg(\nu_H \rho_H)] [1 - \exp(-2,2 \sqrt{F_{zcm}})] & \text{при } F_{zcm} \leq 4; \nu_H > 1; \\ \left( \frac{\nu_r \cdot \rho_r}{\nu_H \cdot \rho_H} \right)^{0,0475} & \text{при } F_{zcm} > 4; \end{cases} \quad (115)$$

$F_{zcm}$  - число Фруда, рассчитанное по расходу смеси,

$$F_{zcm} = \frac{16 \cdot (Q_H + Q_r)^2}{\pi^2 g D^5}; \quad (116)$$

$\nu_r$  - кинематическая вязкость газа;

- $\rho_r$  - относительная (по нефти) плотность газа;  
 $\lambda$  - коэффициент гидравлического сопротивления при течении нефти с приведенной скоростью;  
 $\alpha$  - угол наклона трубопровода к горизонту.

## ПРИМЕР 25

Определить, будет ли обеспечена эмульсионная структура водонефтяного потока в трубопроводе диаметром 0,515 м при следующих условиях:  $Q_m = 1 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $Q_B = 0,6 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $\rho_H = 820 \text{ кг/м}^3$ ;  $v_H = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\rho_B = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $v_B = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\sigma_{HB} = 0,04 \text{ н/м}$ .

## РЕШЕНИЕ

## 1. Расходное водосодержание смеси

$$\beta_B = \frac{0,6}{1+0,6} = 0,375$$

## 2. Приведенная скорость нефти

$$\omega = \frac{4 \cdot 1}{3,14 \cdot 0,515^2} = 4,8 \text{ м/с}$$

## 3. Числа Кутателадзе, Вебера и Рейнольдса по формулам

$$(III): K_B = \frac{4,8 \sqrt{1000}}{\sqrt{9,81 \cdot 0,04 \cdot (1000 - 820)}} = 52,4;$$

$$We = \frac{820 \cdot 0,515 \cdot 4,8^2}{0,04} = 4,1 \cdot 10^6;$$

$$Re = \frac{4,8 \cdot 0,515}{20 \cdot 10^{-6}} = 123600.$$

## 4. Величина параметра

$$M = \frac{(20 \cdot 10^{-6})^5 \cdot (820)^4 \cdot 4,8^3}{0,515 \cdot 0,04^4} = 1,21 \cdot 10^{-4}.$$

## 5. Величина правой части неравенства (II0)

$$S_B = \frac{0,86 (4,1 \cdot 10^{-6})^{0,05} 123600^{0,28}}{\{(1-0,375)[1-0,863 \cdot 0,375 (1,21 \cdot 10^{-4})^{0,75}]\}^{0,2}} = 13,8.$$

Так как  $K_B > S_B$ , т.е. неравенство (II0) выполняется, то эмульсионная структура водонефтяного потока в трубопроводе диаметром 0,515 м обеспечивается.

## ПРИМЕР 26

Определить диаметр трубопровода, обеспечивающий эмульсионную структуру газонефтяного потока, если  $Q_r = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $v_r = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\rho_r = 30 \text{ кг/м}^3$ ;  $\sigma_{HR} = 0,02 \text{ н/м}$ ;  $\alpha = 0$ . Остальные исходные данные взять из примера 25.

## РЕШЕНИЕ

## 1. Расходное газосодержание смеси

$$\beta = \frac{0,1}{1+0,1} = 0,091.$$

## 2. Относительная (по нефти) плотность газа в трубопроводе

$$\bar{\rho}_r = \frac{30}{820} = 0,0366.$$

3. Задаемся диаметром трубопровода  $D = 0,426 \text{ м}$ . При толщине стенки  $\delta = 0,008 \text{ м}$  внутренний диаметр составит

$$D = 0,426 - 2 \cdot 0,008 = 0,41 \text{ м}.$$

## 4. Приведенная скорость нефти в трубопроводе

$$\omega = \frac{4 \cdot 1}{3,14 \cdot 0,41^2} = 7,6 \text{ м/с}.$$

## 5. Вычисляем числа Кутателадзе, Рейнольдса, Вебера и Фруда по формулам (III), (II3), (II4):

$$K_r = \frac{7,6 \sqrt{820}}{\sqrt{9,81 \cdot 0,02 (820 - 30)}} = 61,7; We = \frac{0,02}{820 \cdot 0,41 \cdot 7,6^2} = 1,03 \cdot 10^4;$$

$$Re = \frac{7,6 \cdot 0,41}{20 \cdot 10^{-6}} = 155800; F_2 = \frac{7,6^2}{9,81 \cdot 0,41} = 14,4.$$

6. Переходные числа Рейнольдса при эквивалентной шероховатости труб  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ 

$$Re_I = \frac{10 \cdot 0,41}{2 \cdot 10^{-4}} = 20500; Re_{II} = 50 \cdot 20500 = 1025000.$$

## 7. Коэффициент гидравлического сопротивления находим по формуле Альтшуля, т.к.

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{68}{155800} + \frac{2 \cdot 10^{-4}}{0,41} \right)^{0,25} = 0,019.$$

8. Число Фруда для смеси по формуле (II6)

$$F_{2см} = \frac{16(1+0,1)^2}{3,14 \cdot 9,81 \cdot 0,41^3} = 17,3.$$

9. Коэффициент С по формуле (II5)

$$C = \left( \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 30}{20 \cdot 10^{-6} \cdot 820} \right)^{0,0475} = 0,8.$$

10. Истинное газосодержание потока

$$\varphi = 0,8 \cdot 0,091 = 0,073.$$

11. Правая часть неравенства (II2)

$$S_r = \frac{0,49(0,2+9,25 \cdot 10^{-3} \cdot 14,4^{0,37})}{(1,03 \cdot 10^{-6})^{0,03} \cdot 0,073^{0,05} \cdot 0,0366^{0,08} \cdot 0,019^{0,15} \cdot (1+0,0366)^{0,49}} \cdot \frac{(155800)^{0,25}}{(1-0,0366)} = 39.$$

Так как  $K_r > S_r$ , т.е. неравенство (II2) выполняется, то эмульсионная структура потока обеспечивается. Последовательно принимая ближайшие большие значения диаметра трубопровода и повторяя расчеты, можно найти его максимальную величину, при которой еще будет сохраняться эмульсионная структура газонефтяного потока, а следовательно, будет обеспечена защита внутренней поверхности нефтепровода от коррозии.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 9.015-74. Единая система защиты от коррозии и старения. Подземные сооружения. Общие технических требования. - М.: Издательство стандартов, 1976. - 79 с.

2. Волков Б.Г., Тесов И.И., Шуваков В.В. Справочник по защите подземных металлических сооружений от коррозии. - Л.: Недра, 1975. - 224 с.

3. Глазков В.И., Котин В.Г., Глазов Н.П. Расчет коэффициентов экранирования заземленных электродов // Тр. / ВНИИСТ. Вып. 23, 1970. С.29-47.

4. Глазков В.И., Зиневич А.М., Котин В.Г. Защита от коррозии протяженных металлических сооружений. - М.: Недра, 1969. - 311 с.

5. Глазов Н.П., Уткин В.К. Защита стальных резервуаров от внутренней коррозии: Тематический обзор. - М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1973. - 82 с.

6. Дизенко Е.И., Новоселов В.Ф., Тугунов П.И. Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров. - М.: Недра, 1975. - 199 с.

7. Зиневич А.М., Глазков В.И., Котин В.Г. Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии. - М.: Недра, 1975. - 288 с.

8. Инструкция по защите городских подземных трубопроводов от электрохимической коррозии. - М.: Стройиздат, 1982. - 145 с.

9. Котин В.Г., Глазков В.И., Глазов Н.П. Расчет параметров катодной установки с экранными заземлениями // Тр. / ВНИИСТ. Вып. 23, 1970. С.67-83.

10. Никитенко Е.А. Электрохимическая коррозия и защита магистральных газопроводов. - М.: Недра, 1972. - 120 с.

11. Районный преискурант на электрозащиту от коррозии подземных инженерных сетей населенных пунктов. - М.: Стройиздат, 1975. - 88 с.

12. Рекомендации по протекторной защите дна стальных резервуаров от коррозии, вызываемой дренажной водой, и технология монтажа протекторов в действующих резервуарах. - М.: ЦНИИ ВНИИСТ, 1974. - 46 с.

13. Указания по прогнозированию изменения защитных свойств изоляционных покрытий и параметров установок катодной защиты магистральных трубопроводов. ВИС 1-53-74. - М.: ЦНИИ ВНИИСТ, 1974. - 22 с.

14. Медведев В.Ф. Сбор и подготовка неустойчивых эмульсий на промыслах. - М.: Недра, 1987. - 144 с.

15. Коршак А.А. Предупреждение формирования газовых скоплений в процессе перекачки газонефтяных смесей эмульсионной структуры // Сбор и подготовка нефти на промыслах. - Уфа: ВНИИСПНефть, 1988. С. 36-38.

# ПРИЛОЖЕНИЕ I

Продольное сопротивление  $R_T \cdot 10^6$  Ом.м магистральных трубопроводов  
диаметром 146-1420 мм (удельное сопротивление трубной стали принималось  
равным 0,245 Ом.мм<sup>2</sup>/м при температуре 20 °С)

| Диаметр<br>трубопро-<br>вода, мм | Толщина стенки, мм |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                  | 4                  | 5    | 5,5  | 6    | 6,5  | 7    | 7,5  | 8    | 8,5  | 9    |
| 146                              | 137                | 111  | 101  | 92,9 | 86,1 | 80,2 | 75,1 | 70,7 |      |      |
| 152                              | 132                | 106  | 96,8 | 89,1 | 82,5 | 76,9 | 72,0 | 67,6 |      |      |
| 159                              | 126                | 101  | 92,4 | 85,0 | 78,7 | 73,3 | 68,7 | 64,6 |      |      |
| 168                              | 119                | 95,7 | 87,3 | 80,3 | 74,3 | 69,2 | 64,8 | 61,0 |      |      |
| 180                              | 111                | 89,2 | 81,3 | 74,7 | 69,2 | 64,4 | 60,3 | 56,7 |      |      |
| 194                              | 103                | 82,6 | 75,3 | 69,2 | 64,0 | 59,6 | 56,8 | 52,4 |      |      |
| 219                              | 90,7               | 73,2 | 66,5 | 61,1 | 56,5 | 52,6 | 49,2 | 46,2 |      |      |
| 245                              | 80,9               | 65,0 | 59,2 | 54,4 | 50,3 | 46,8 | 43,8 | 41,1 |      |      |
| 273                              | 72,5               | 58,2 | 53,0 | 48,7 | 45,0 | 41,9 | 39,2 | 36,8 |      |      |
| 299                              | 66,1               | 53,1 | 48,3 | 44,4 | 41,0 | 38,2 | 35,7 | 33,5 |      |      |
| 325                              | 60,8               | 48,8 | 44,4 | 40,8 | 37,7 | 35,1 | 32,8 | 30,8 |      |      |
| 377                              | 52,3               | 41,9 | 38,2 | 35,1 | 32,4 | 30,1 | 28,2 | 26,4 | 24,9 | 20,8 |
| 426                              | 56,2               | 37,3 | 36,7 | 31,0 | 28,6 | 24,6 | 24,9 | 23,3 | 22,0 | 16,6 |
| 530                              |                    | 29,7 | 27,1 | 24,8 | 22,9 | 21,3 | 19,9 | 18,7 | 17,6 | 12,2 |
| 720                              |                    |      |      |      | 16,8 | 15,6 | 14,6 | 13,7 | 12,9 |      |

Продолжение приложения I

| Наруж-<br>ный диа-<br>метр<br>трубо-<br>прово-<br>да, мм | Толщина стенки, мм |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|  | 8                  | 8,5  | 9,0  | 9,5  | 10   | 10,5 | 11   | 11,5 | 12   | 12,5 | 14   |
| 820  | 12,0               | 11,3 | 10,7 | 10,1 | 9,63 | 9,18 | 8,77 | 8,39 | 6,45 | 6,20 | 5,54 |
| 1020   |                    |      | 8,58 | 8,13 | 7,72 | 7,36 | 7,03 | 6,73 | 5,87 | 5,61 | 5,18 |
| 1220   |                    |      |      |      |      |      |      |      | 5,38 | 3,17 | 4,62 |
| 1420   |                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 3,96 |
|  |                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 3,70 |
|  |                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 3,47 |
|  |                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 3,27 |
|  |                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 2,79 |

90

91

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Показательные и гиперболические функции

| x    | $e^x$  | $e^{-x}$ | sh(x)  | ch(x)  | th(x)  |
|------|--------|----------|--------|--------|--------|
| 1    | 2      | 3        | 4      | 5      | 6      |
| 0,00 | 1,0000 | 1,0000   | 0,0000 | 1,0000 | 0,0000 |
| 01   | 1,0101 | 0,9900   | 0,0100 | 1,0001 | 0,0100 |
| 02   | 1,0202 | 0,9802   | 0,0200 | 1,0002 | 0,0200 |
| 03   | 1,0305 | 0,9704   | 0,0300 | 1,0005 | 0,0300 |
| 04   | 1,0408 | 0,9608   | 0,0400 | 1,0008 | 0,0400 |
| 0,05 | 1,0513 | 0,9512   | 0,0500 | 1,0013 | 0,0500 |
| 06   | 1,0618 | 0,9418   | 0,0600 | 1,0018 | 0,0599 |
| 07   | 1,0725 | 0,9324   | 0,0701 | 1,0025 | 0,0699 |
| 08   | 1,0833 | 0,9231   | 0,0801 | 1,0032 | 0,0798 |
| 09   | 1,0942 | 0,9139   | 0,0901 | 1,0041 | 0,0898 |
| 0,10 | 1,1052 | 0,9048   | 0,1002 | 1,0050 | 0,0997 |
| 11   | 1,1163 | 0,8958   | 0,1102 | 1,0061 | 0,1096 |
| 12   | 1,1276 | 0,8869   | 0,1203 | 1,0072 | 0,1194 |
| 13   | 1,1388 | 0,8781   | 0,1304 | 1,0085 | 0,1293 |
| 14   | 1,1503 | 0,8694   | 1,1405 | 1,0098 | 0,1391 |
| 0,15 | 1,1618 | 0,8607   | 0,1506 | 1,0113 | 0,1489 |
| 16   | 1,1735 | 0,8521   | 0,1607 | 1,0128 | 0,1586 |
| 17   | 1,1853 | 0,8437   | 0,1708 | 1,0145 | 0,1684 |
| 18   | 1,1972 | 0,8353   | 0,1810 | 1,0161 | 0,1781 |
| 19   | 1,2092 | 0,8270   | 0,1911 | 1,0181 | 0,1877 |
| 0,20 | 1,2214 | 0,8187   | 0,2013 | 1,0201 | 0,1974 |
| 21   | 1,2337 | 0,8106   | 0,2115 | 1,0221 | 0,2070 |
| 22   | 1,2461 | 0,8025   | 0,2218 | 1,0243 | 0,2165 |
| 23   | 1,2586 | 0,7945   | 0,2320 | 1,0266 | 0,2260 |
| 24   | 1,2712 | 0,7866   | 0,2423 | 1,0289 | 0,2355 |
| 0,25 | 1,2840 | 0,7788   | 0,2526 | 1,0314 | 0,2449 |
| 26   | 1,2969 | 0,7711   | 0,2629 | 1,0340 | 0,2543 |
| 27   | 1,3100 | 0,7634   | 0,2733 | 1,0367 | 0,2636 |
| 28   | 1,3231 | 0,7558   | 0,2837 | 1,0395 | 0,2729 |
| 29   | 1,3364 | 0,7483   | 0,2941 | 1,0423 | 0,2821 |

## Продолжение приложения 2

| I    | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,30 | I,3499 | 0,7408 | 0,3045 | I,0453 | 0,2913 |
| 31   | I,3634 | 0,7334 | 0,3150 | I,0484 | 0,3004 |
| 32   | I,3771 | 0,7261 | 0,3255 | I,0516 | 0,3095 |
| 33   | I,3910 | 0,7189 | 0,3360 | I,0549 | 0,3185 |
| 34   | I,4049 | 0,7118 | 0,3466 | I,0584 | 0,3275 |
| 0,35 | I,4191 | 0,7047 | 0,3572 | I,0619 | 0,3364 |
| 36   | I,4333 | 0,6977 | 0,3678 | I,0655 | 0,3452 |
| 37   | I,4477 | 0,6907 | 0,3785 | I,0692 | 0,3540 |
| 38   | I,4623 | 0,6839 | 0,3892 | I,0731 | 0,3627 |
| 39   | I,4770 | 0,6771 | 0,4000 | I,0770 | 0,3514 |
| 0,40 | I,4918 | 0,6703 | 0,4108 | I,0811 | 0,3799 |
| 41   | I,5068 | 0,663  | 0,4216 | I,0852 | 0,3885 |
| 42   | I,5220 | 0,6570 | 0,4325 | I,0895 | 0,3969 |
| 43   | I,5373 | 0,6505 | 0,4434 | I,0939 | 0,4053 |
| 44   | I,5527 | 0,6440 | 0,4543 | I,0984 | 0,4136 |
| 0,45 | I,5683 | 0,6376 | 0,4553 | I,1020 | 0,4219 |
| 46   | I,5811 | 0,6313 | 0,4764 | I,1077 | 0,4301 |
| 47   | I,6000 | 0,6250 | 0,4875 | I,1125 | 0,4382 |
| 48   | I,6161 | 0,6188 | 0,4986 | I,1174 | 0,4462 |
| 49   | I,6323 | 0,6126 | 0,5098 | I,1225 | 0,4542 |
| 0,50 | I,6487 | 0,6065 | 0,5211 | I,1276 | 0,4621 |
| 51   | I,6653 | 0,6005 | 0,5324 | I,1329 | 0,4699 |
| 52   | I,6820 | 0,5945 | 0,5438 | I,1383 | 0,4777 |
| 53   | I,6989 | 0,5886 | 0,5552 | I,1438 | 0,4854 |
| 54   | I,7160 | 0,5827 | 0,5666 | I,1494 | 0,4930 |
| 0,55 | I,7333 | 0,5769 | 0,5782 | I,1551 | 0,5005 |
| 56   | I,7507 | 0,5712 | 0,5897 | I,1609 | 0,5080 |
| 57   | I,7683 | 0,5655 | 0,6014 | I,1692 | 0,5154 |
| 58   | I,7860 | 0,5599 | 0,6131 | I,1730 | 0,5227 |
| 59   | I,8040 | 0,5543 | 0,6248 | I,1792 | 0,5299 |
| 0,60 | I,8221 | 0,5488 | 0,6367 | I,1855 | 0,5370 |
| 61   | I,8404 | 0,5434 | 0,6485 | I,1919 | 0,5441 |
| 62   | I,8589 | 0,5379 | 0,6605 | I,1984 | 0,5511 |

## Продолжение приложения 2

| I    | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 63   | I,8776 | 0,5326 | 0,6725 | I,2051 | 0,5581 |
| 64   | I,8965 | 0,5273 | 0,6846 | I,2119 | 0,5649 |
| 0,65 | I,9155 | 0,5220 | 0,6967 | I,2258 | 0,5717 |
| 66   | I,9348 | 0,5169 | 0,7090 | I,2258 | 0,5784 |
| 67   | I,9542 | 0,5117 | 0,7213 | I,2330 | 0,5850 |
| 68   | I,9739 | 0,5066 | 0,7336 | I,2402 | 0,5919 |
| 69   | I,9937 | 0,5016 | 0,7461 | I,2476 | 0,5980 |
| 0,70 | 2,0138 | 0,4966 | 0,7586 | I,2552 | 0,6044 |
| 71   | 2,0340 | 0,4916 | 0,7712 | I,2628 | 0,6107 |
| 72   | 2,0544 | 0,4868 | 0,7838 | I,2706 | 0,6169 |
| 73   | 2,0751 | 0,4819 | 0,7966 | I,2765 | 0,6231 |
| 74   | 2,0959 | 0,4771 | 0,8094 | I,2865 | 0,6291 |
| 0,75 | 2,1170 | 0,4624 | 0,8223 | I,2947 | 0,6351 |
| 76   | 2,1383 | 0,4677 | 0,8353 | I,3030 | 0,6411 |
| 77   | 2,1598 | 0,4630 | 0,8484 | I,3114 | 0,6469 |
| 78   | 2,1815 | 0,4584 | 0,8615 | I,3199 | 0,6527 |
| 79   | 2,2034 | 0,4538 | 0,8748 | I,3286 | 0,6584 |
| 0,80 | 2,2255 | 0,4493 | 0,8881 | I,3374 | 0,6640 |
| 81   | 2,2479 | 0,4449 | 0,9015 | I,3464 | 0,6696 |
| 82   | 2,2705 | 0,4404 | 0,9150 | I,3555 | 0,6751 |
| 83   | 2,2933 | 0,4360 | 0,9286 | I,3647 | 0,6805 |
| 84   | 2,3164 | 0,4317 | 0,9223 | I,3740 | 0,6858 |
| 0,85 | 2,3396 | 0,4274 | 0,9561 | I,3835 | 0,6911 |
| 86   | 2,3632 | 0,4232 | 0,9700 | I,3932 | 0,6963 |
| 87   | 2,3869 | 0,4190 | 0,9840 | I,4029 | 0,7014 |
| 88   | 2,4109 | 0,4148 | 0,9981 | I,4128 | 0,7064 |
| 89   | 2,4315 | 0,4107 | 1,0122 | I,4229 | 0,7114 |
| 0,90 | 2,4596 | 0,4066 | 1,0265 | I,4331 | 0,7163 |
| 91   | 2,4843 | 0,4025 | 1,0409 | I,4434 | 0,7211 |
| 92   | 2,5093 | 0,3985 | 1,0554 | I,4539 | 0,7259 |
| 93   | 2,5345 | 0,3946 | 1,0700 | I,4645 | 0,7306 |
| 94   | 2,5600 | 0,3906 | 1,0847 | I,4753 | 0,7352 |

## Продолжение приложения 2

| 1    | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,95 | 2,5857 | 0,3867 | 1,0995 | 1,4862 | 0,7398 |
| 96   | 2,6117 | 0,3829 | 1,1144 | 1,4973 | 0,7443 |
| 97   | 2,6379 | 0,3791 | 1,1294 | 1,5085 | 0,7487 |
| 98   | 2,6645 | 0,3753 | 1,1446 | 1,5199 | 0,7531 |
| 99   | 2,6912 | 0,3716 | 1,1598 | 1,5314 | 0,7574 |
| 1,00 | 2,7183 | 0,3679 | 1,1752 | 1,5431 | 0,7616 |
| 01   | 2,7456 | 0,3642 | 1,1907 | 1,5549 | 0,7658 |
| 02   | 2,7732 | 0,3606 | 1,2063 | 1,5669 | 0,7699 |
| 03   | 2,8011 | 0,3570 | 1,2220 | 1,5790 | 0,7739 |
| 04   | 2,8292 | 0,3535 | 1,2379 | 1,5913 | 0,7779 |
| 1,05 | 2,8577 | 0,3499 | 1,2539 | 1,6038 | 0,7818 |
| 06   | 2,8864 | 0,3465 | 1,2700 | 1,6164 | 0,7857 |
| 07   | 2,9154 | 0,3430 | 1,2862 | 1,6292 | 0,7895 |
| 08   | 2,9447 | 0,3396 | 1,3025 | 1,6421 | 0,7932 |
| 09   | 2,9743 | 0,3362 | 1,3190 | 1,6552 | 0,7969 |
| 1,10 | 3,0042 | 0,3329 | 1,3356 | 1,6685 | 0,8005 |
| 11   | 3,0344 | 0,3296 | 1,3524 | 1,6820 | 0,8041 |
| 12   | 3,0649 | 0,3263 | 1,3693 | 1,6956 | 0,8076 |
| 13   | 3,0957 | 0,3230 | 1,3863 | 1,7093 | 0,8110 |
| 14   | 3,1268 | 0,3198 | 1,4035 | 1,7233 | 0,8144 |
| 1,15 | 3,1582 | 0,3166 | 1,4208 | 1,7374 | 0,8178 |
| 16   | 3,1899 | 0,3135 | 1,4382 | 1,7517 | 0,8210 |
| 17   | 3,2220 | 0,3104 | 1,4558 | 1,7662 | 0,8243 |
| 18   | 3,2544 | 0,3073 | 1,4735 | 1,7806 | 0,8275 |
| 19   | 3,2871 | 0,3042 | 1,4914 | 1,7957 | 0,8306 |
| 1,20 | 3,3201 | 0,3012 | 1,5095 | 1,8107 | 0,8337 |
| 21   | 3,3535 | 0,2982 | 1,5276 | 1,8258 | 0,8367 |
| 22   | 3,3872 | 0,2952 | 1,5460 | 1,8412 | 0,8397 |
| 23   | 3,4212 | 0,2923 | 1,5645 | 1,8568 | 0,8426 |
| 24   | 3,4556 | 0,2894 | 1,5831 | 1,8725 | 0,8455 |
| 1,25 | 3,4903 | 0,2865 | 1,6019 | 1,9994 | 0,8483 |
| 26   | 3,5254 | 0,2837 | 1,6209 | 1,9045 | 0,8511 |
| 27   | 3,5609 | 0,2808 | 1,6400 | 1,9208 | 0,8508 |

## Продолжение приложения 2

| 1    | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 28   | 3,5966 | 0,2780 | 1,6593 | 1,9373 | 0,8565 |
| 29   | 3,6328 | 0,2753 | 1,6788 | 1,9540 | 0,8591 |
| 1,30 | 3,6693 | 0,2725 | 1,6984 | 1,9709 | 0,8617 |
| 31   | 3,7062 | 0,2698 | 1,7182 | 1,9880 | 0,8643 |
| 32   | 3,7434 | 0,2671 | 1,7381 | 2,0053 | 0,8668 |
| 33   | 3,7810 | 0,2645 | 1,7583 | 2,0228 | 0,8692 |
| 34   | 3,8190 | 0,2618 | 1,7786 | 2,0404 | 0,8717 |
| 1,35 | 3,8574 | 0,2592 | 1,7991 | 2,0583 | 0,8741 |
| 36   | 3,8962 | 0,2567 | 1,8198 | 2,0764 | 0,8764 |
| 37   | 3,9354 | 0,2541 | 1,8406 | 2,0947 | 0,8787 |
| 38   | 3,9749 | 0,2516 | 1,8617 | 2,1132 | 0,8810 |
| 39   | 4,0149 | 0,2491 | 1,8829 | 2,1320 | 0,8832 |
| 1,40 | 4,0552 | 0,2466 | 1,9043 | 2,1509 | 0,8854 |
| 41   | 4,0960 | 0,2441 | 1,9259 | 2,1700 | 0,8875 |
| 42   | 4,1371 | 0,2417 | 1,9477 | 2,1894 | 0,8896 |
| 43   | 4,1787 | 0,2393 | 1,9697 | 2,2090 | 0,8917 |
| 44   | 4,2207 | 0,2369 | 1,9919 | 2,2288 | 0,8937 |
| 1,45 | 4,2631 | 0,2346 | 1,0143 | 2,2436 | 0,8957 |
| 46   | 4,3060 | 0,2322 | 2,0369 | 2,2691 | 0,8977 |
| 47   | 4,3492 | 0,2299 | 2,0597 | 2,2896 | 0,8996 |
| 48   | 4,3929 | 0,2276 | 2,0827 | 2,3103 | 0,9015 |
| 49   | 4,4371 | 0,2254 | 2,1059 | 2,3312 | 0,9033 |
| 1,50 | 4,4817 | 0,2331 | 2,1293 | 2,3524 | 0,9051 |
| 51   | 4,5267 | 0,2209 | 2,1529 | 2,3738 | 0,9069 |
| 52   | 4,5722 | 0,2187 | 2,1768 | 2,3955 | 0,9087 |
| 53   | 4,6182 | 0,2165 | 2,2008 | 2,4174 | 0,9104 |
| 54   | 4,6646 | 0,2144 | 2,2251 | 2,4395 | 0,9121 |
| 1,55 | 4,7115 | 0,2122 | 2,2496 | 2,4619 | 0,9138 |
| 56   | 4,7588 | 0,2101 | 2,2743 | 2,4845 | 0,9154 |
| 57   | 4,8066 | 0,2080 | 2,2993 | 2,5073 | 0,9170 |
| 58   | 4,8550 | 0,2060 | 2,3245 | 2,5305 | 0,9186 |
| 59   | 4,9037 | 0,2039 | 2,3499 | 2,5538 | 0,9201 |
| 1,60 | 4,9530 | 0,2019 | 2,3756 | 2,5775 | 0,9217 |



## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Характеристика проводов линии электропередачи

| Марка проводов             | Число и диаметр проводов, мм | Фактическое сечение, мм <sup>2</sup> |
|----------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| <u>Медные провода</u>      |                              |                                      |
| М-4                        | 1 x 2,2                      | 3,8                                  |
| М-6                        | 1 x 2,7                      | 5,72                                 |
| М-10                       | 1 x 3,5                      | 9,6                                  |
| М-16                       | 1 x 1,7                      | 15,09                                |
| М-25                       | 7 x 2,1                      | 24,25                                |
| М-35                       | 7 x 2,5                      | 34,36                                |
| М-50                       | 7 x 3,0                      | 49,48                                |
| М-60                       | 12 x 2,5                     | 59,0                                 |
| М-70                       | 19 x 2,12                    | 67,0                                 |
| <u>Алюминиевые провода</u> |                              |                                      |
| А-16                       | 7 x 1,70                     | 15,89                                |
| А-25                       | 7 x 2,10                     | 24,25                                |
| А-35                       | 7 x 2,50                     | 34,36                                |
| А-50                       | 7 x 3,00                     | 49,48                                |
| А-70                       | 7 x 3,54                     | 68,90                                |
| А-95                       | 7 x 4,15                     | 94,90                                |
| А-120                      | 19 x 2,80                    | 117,0                                |
| <u>Стальные провода</u>    |                              |                                      |
| а) одножильные             |                              |                                      |
| Ж-4                        | 1 x 4                        | 12,5                                 |
| Ж-5                        | 1 x 5                        | 19,6                                 |
| Ж-6                        | 1 x 6                        | 28,3                                 |
| б) многожильные            |                              |                                      |
| ПС-25                      | 5 x 2,5                      | 24,6                                 |
| ПС-35                      | 7 x 2,6                      | 37,2                                 |
| ПС-50                      | 12 x 2,3                     | 49,5                                 |
| ПС-70                      | 19 x 2,3                     | 78,8                                 |
| ПС-95                      | 37 x 1,8                     | 94,0                                 |

## СОДЕРЖАНИЕ

|   | с. |
|---|----|
| I. РАСЧЕТ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ СТАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ  | 3  |
| I.1. Исходные данные  | 3  |
| I.1.1. Удельное электросопротивление грунта   | 3  |
| I.1.2. Продольное сопротивление трубопровода  | 4  |
| I.1.3. Переходное сопротивление "трубопровод-грунт"   | 5  |
| I.1.4. Входное сопротивление изолированного трубопровода  | 8  |
| I.1.5. Постоянная распределения потенциалов и токов вдоль защищаемого трубопровода                            | 9  |
| I.1.6. Расчетные значения потенциалов   | 10 |
| I.2. Расчетные зависимости для распределения наложенной разности потенциалов и тока защиты вдоль трубопровода | 11 |
| I.2.1. Общие сведения   | 11 |
| I.2.2. Станция катодной защиты "бесконечной длины"  | 12 |
| I.2.3. Катодная защита коротких трубопроводов   | 13 |
| I.2.4. Катодная защита магистрального трубопровода  | 17 |
| I.3. Расчет и оптимизация установок катодной защиты   | 19 |
| I.3.1. Сопротивление растеканию тока с анодного заземления  | 19 |
| I.3.2. Мощность, потребляемая СКЗ. Выбор типа СКЗ   | 26 |
| I.3.3. Срок службы анодного заземления  | 28 |
| I.3.4. Количество электродов анодного заземления  | 32 |
| I.3.5. Сечение дренажного провода катодной установки  | 33 |
| I.3.6. Удаление анодного заземления от магистрального трубопровода  | 34 |
| I.4. Методы увеличения зоны защиты катодных установок   | 44 |
| I.4.1. Катодные установки с экранными заземлениями  | 45 |
| I.4.2. Катодные установки с противопотенциалом  | 49 |
| I.5. Совместная катодная защита подземных металлических сооружений  | 55 |
| I.5.1. Параллельно уложенные трубопроводы   | 55 |

|  |    |
|--|----|
| 1.5.2. Разветвленные коммуникации перекачивающих станций и нефтебаз                                  | 58 |
| 2. ПРОТЕКТОРНАЯ ЗАЩИТА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ  | 60 |
| 2.1. Расчет протекторной защиты магистрального трубопровода  | 60 |
| 2.2. Расчет протекторной защиты резервуаров  | 67 |
| 2.2.1. Расчет защиты дна резервуара типа РВС одиночными протекторными установками                    | 67 |
| 2.2.2. Расчет защиты дна резервуара типа РВС групповыми протекторными установками                    | 72 |
| 2.2.3. Расчет защиты внутренней поверхности резервуаров от коррозии при контакте с подтоварной водой | 74 |
| 3. ЭЛЕКТРОДРЕНАЖНАЯ ЗАЩИТА ОТ ВЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ   | 78 |
| 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ БОРЬБЫ С ВНУТРЕННЕЙ КОРРОЗИЕЙ НЕФТЕПРОВОДОВ                                | 82 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ   | 87 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1   | 89 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2   | 91 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 3   | 96 |

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

УФИМСКИЙ НЕФТЯНОЙ ИНСТИТУТ

НОВОСЕЛОВ Виктор Федорович  
КОГШАК Алексей Анатольевич  
ДИМИТРОВ Вячеслав Николаевич

ТИПОВЫЕ РАСЧЕТЫ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ  
ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ  
НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ И НЕФТЕБАЗ

Учебное пособие

Редактор СИНИЛОВА А.А.

Технический редактор ЕЛИСЕЕВА В.Ф.

Свод. тем. пл. № II68.

Подписано к печати 31.05.89. П00/91.

Формат бумаги 60x84 I/16. Бумага оберточная.

Печать офсетная. Уч.-изд. листов 5,0.

Печ. листов 5,0. Тираж 300 экз. Заказ 734

Цена 20 к.

Уфимский нефтяной институт  
Ротапринт Уфимского нефтяного института  
Адрес института и полиграфпредприятия:  
450062, Уфа, Космонавтов, I