

В.Н.Ткаченко

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА
трубопроводных сетей



Стройиздат 2004

УДК 620.197.5(075.8)

Ткаченко В.Н. Электрохимическая защита трубопроводных сетей / Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 2004. - 320 с.

В популярной форме представлена процессы электрохимической коррозии и защиты (ЭХЗ) как проблема теории токов в земле для сложных трубопроводных сетей с неоднородными параметрами (сетевая задача).

Даны рекомендации по методам коррозионных изысканий, подготовке исходных данных для расчета сетевой задачи как сугубо практической, описаны комплексы компьютерных программ АРМ-ЭХЗ-6П и АРМ-ЭХЗ-7П с подробным теоретическим и методическим обоснованием.

Приведены многочисленные примеры инженерного решения сетевой задачи для ситуаций, ранее не поддававшихся численному анализу. Показаны возможности предлагаемого метода при расчете арматурных сетей железобетонных сооружений, сложных контуров заземлений и других стержневых конструкций, как частных случаев сетевой задачи.

Предназначена для студентов и инженерно-технических работников в области проектирования, наладки и эксплуатации ЭХЗ подземных трубопроводов и сооружений.

Таблиц - 43, иллюстраций - 78, библиография - 36.

Оглавление

Оглавление	3
Предисловие	8
Глава 1. Проблемы коррозии и защиты	10
1.1. Коррозионные потери	-
1.2. Классификация процессов коррозии	11
1.3. Классификация методов защиты	14
1.3.1. Коррозионностойкие материалы	-
1.3.2. Изолирующие покрытия	15
1.3.3. Электрохимическая защита	19
1.3.4. Прочие виды защиты	22
1.4. Нормы и правила	23
1.5. Развитие науки о коррозии и защите	25
Глава 2. Процессы электрохимической коррозии	28
2.1. Первопричины коррозии	-
2.2. Движущая сила токов коррозии	30
2.2.1. Гальванопара на поверхности металлического сооружения	-
2.2.2. Гальванические микронеоднородности	31
2.2.3. Коррозионные макропары	36
2.3. Факторы коррозии	39
2.4. Потенциал и ток коррозии	41
2.5. Показатели коррозионного разрушения	44
2.5.1. Скорость коррозии в соответствии с законом Фарадея	-
2.5.2. Экспериментальное определение скорости коррозии	45
Глава 3. Коррозионная диагностика	47
3.1. Задачи коррозионных исследований	-
3.2. Определение агрессивности грунта	48
3.2.1. Метод удельного электрического сопротивления грунта	50
3.2.2. Метод катодной поляризации.	52
3.3. Определение анодных зон в поле токов коррозии	53
3.3.1. Метод градиента потенциала	53
3.3.2. Метод выносного электрода	55
3.3.3. Трехэлектродный метод	56
3.4. Электроизмерительные приборы и оборудование	58
3.4.1. Электроды сравнения	-
3.4.2. Электроизмерительные приборы	59
3.4.3. Прерыватели тока	60
3.4.4. Трассоискатели и дефектоскопы	-
3.5. Компьютерный анализ поля токов коррозии	61
Глава 4. Блуждающие токи	65

4.1. Источники блуждающих токов	-
4.1.1. Линии рельсового электротранспорта	66
4.1.2. Линии электропередач постоянного тока	69
4.2. Компьютерный анализ поля блуждающих токов	70
4.3. Измерения в поле блуждающих токов	72
4.3.1. Разность потенциалов труба-земля	-
4.3.2. Градиент потенциала в земле	73
4.4. Мероприятия по ограничению блуждающих токов	76
Глава 5. Токи электрохимической защиты	80
5.1. Электрохимическая защита	-
5.2. Катодная поляризационная характеристика	81
5.3. Критерии электрохимической защиты	83
5.3.1. Минимальная защитная плотность тока	84
5.3.2. Минимальное защитное смещение потенциала	85
5.3.3. Минимальный защитный потенциал	87
5.3.4. Максимальный защитный потенциал	89
5.4. Измерение поляризационной составляющей защитного потенциала	91
5.5. Компьютерный оценка поляризационной составляющей	94
5.6. Вторичные явления при электрохимической защите	98
5.6.1. Катодные осадки	-
5.6.2. Последствие катодной поляризации	102
Глава 6. Решение сетевой задачи электрохимической защиты	104
6.1. Исходная система уравнений	-
6.1.1. Сетевая задача электрохимической защиты	-
6.1.2. Основные уравнения и формулы	105
6.1.3. Граничные условия для участка сети	109
6.1.4. Система уравнений для обособленной сети	112
6.2. Численный метод расчета сетевой задачи	113
6.2.1. Основные положения метода дискретизации	-
6.2.2. Система уравнений для сети с дискретными параметрами	115
6.2.3. Решение системы уравнений	116
6.3. Расчет трубопроводной сети произвольной сложности	118
6.4. Оптимизационные задачи электрохимической защиты	119
6.5. Нелинейная сетевая задача	122
Глава 7. Методическое обеспечение задач ЭХЗ	141
7.1. Содержание комплекса компьютерных программ	-
7.1.1. Назначение пакета программ АРМ ЭХЗ-5П	-
7.1.2. Структура пакета программ	144
7.2. Расчетные параметры трубопровода	146
7.2.1. Удельное продольное сопротивление	-
7.2.2. Удельное сопротивление изоляции	147

7.2.3. Удельное электрическое сопротивление грунта	149
7.2.4. Стационарный потенциал	151
7.3. Расчетная схема трубопроводной сети	154
7.3.1. Шаг дискретизации	155
7.3.2. Конфигурация расчетной схемы сети	158
7.3.3. Периферийная сеть	159
7.4. Расчетная схема системы ЭХЗ	163
7.4.1. Оптимизационная сетевая задача	164
7.4.2. Расчет при заданных токах	166
7.4.3. Расчет качества изоляции	-
7.4.4. Расчет токов коррозии	167
Глава 8. Устройство катодной станции	168
8.1. Схемы соединений катодной станции	-
8.2. Катодный преобразователь	169
8.3. Конструкции анодных заземлителей	172
8.4. Материал анодных заземлителей	176
8.4.1. Сталь и чугун	177
8.4.2. Графит	179
8.4.3. Ферросилид	182
8.4.4. Свинец	184
8.4.5. Магнетит	-
8.4.6. Платина	185
8.5. Расчет катодной защиты	186
8.5.1. Постановка задачи	186
8.5.2. Расчет влияния анодного заземлителя на пассивный трубопровод	188
8.5.3. Расчет влияния анодного заземлителя на активный трубопровод	192
8.5.4. Анодный заземлитель в трубопроводной сети	195
8.6. Расчет анодного заземлителя	196
8.6.1. Сопротивление растеканию электрода	-
8.6.2. Сопротивление растеканию группы электродов	199
8.6.3. Экономичное число стержней заземлителя	-
8.6.4. Срок службы анодного заземлителя	201
8.7. Вспомогательное оборудование	202
8.7.1. Дренажная и питающая линии	203
8.7.2. Изолирующее фланцевое соединение	207
8.7.3. Контактные устройства	210
8.7.4. Блоки совместной защиты	-
Глава 9. Протекторная защита	213
9.1. Общие сведения	-
9.2. Протекторные материалы	216
9.3. Протекторные установки	219

9.3.1. Конструкции протекторов	-
9.3.2. Активаторная засыпка	221
9.3.3. Размещение протекторов	222
9.4. Расчет протекторной защиты	223
9.4.1. Расчет при заданном токе протекторной установки	-
9.4.2. Расчет гальванической пары протектор-трубопровод	224
9.4.3. Оценочный расчет протекторной защиты	225
Глава 10. Электродренажная защита	230
10.1. Общие сведения	-
10.2. Схемы электродренажной защиты	232
10.2.1. Прямой электродренаж	233
10.2.1. Поляризованный электродренаж	234
10.2.3. Усиленный электродренаж	236
10.3. Расчет дренажной защиты	237
10.3.1. Общие требования к расчетной схеме	-
10.3.2. Шаг дискретизации рельсовой линии	239
10.3.3. Погрешность поля дискретного проводника	240
10.3.4. Конфигурация расчетной схемы рельсовой сети	241
10.3.5. Рельсовая линия как эквивалентный трубопровод	244
10.3.6. Дренажные цепи	245
Глава 11. Схемы электрохимической защиты	252
11.1. Катодные станции с несколькими заземлителями	252
11.1.1. Распределенные заземлители	-
11.1.2. Катодная станция с противоположным потенциалом	254
11.1.3. Катодная станция с заземлителем-токовводом	255
11.2. Совместная защита	257
11.2.1. Два параллельно уложенных трубопровода	-
11.2.2. Пучок параллельно уложенных трубопроводов	260
11.2.3. Близко расположенные трубопроводы	263
11.2.4. Пересекающиеся трубопроводы вблизи анодного заземлителя	266
11.3. Заземленные трубопроводы	268
11.3.1. Заземление как эквивалентный трубопровод	269
11.3.2. Влияние заземления на эффективность защиты	272
11.3.3. Многократно заземленная трубопроводная сеть	275
Глава 12. Заземленные железобетонные конструкции	279
12.1. Коррозия железобетона	-
12.2. Бетон как коррозионная среда	280
12.3. Электрохимические параметры арматуры	282
12.3.1. Электрохимический потенциал	-
12.3.2. Катодное поляризационное сопротивление	283
12.3.3. Анодное поляризационное сопротивление	284
12.4. Арматурная сетка как эквивалентная трубопроводная сеть	285

12.4.1. Пучек из стержней	-
12.4.2. Сетка участка конструкции	286
12.4.3. Эквивалентная сеть сооружения	290
12.5. Распределение токов коррозии по окружности стержня	297
12.5.1. Постановка задачи	298
12.5.2. Аналитическое решение	299
12.5.3. Численное решение	301
12.5.4. Анализ результатов расчета	303
Литература	306

Предисловие

В науке о коррозии и защите от нее сделано настолько много, что у практиков часто пропадает всякая надежда отыскать в этом море информации что-то срочно необходимое и которое, возможно, давно покоится на N-ой странице толстой монографии весьма уважаемого автора. Поэтому инженер часто не очень лестно отзывается о деятельности коллеги-ученого, который “не дает ничего нового”, порой скрывая за этим скепсисом свое незнание или неумение найти давно подготовленную для него отгадку нерешенной задачи. Если бы инженер-коррозионист старательно и, что весьма важно, своевременно реализовывал все, что ему рекомендуют ученые, то можно было бы избежать катастрофических коррозионных разрушений, которые время от времени будоражат мир.

Эта книга сделана для тех, кто хочет уложить свою трубу в землю на 100 лет, и чтобы о ее коррозионном состоянии не беспокоились ни его внуки, ни его правнуки. Книга написана языком, доступным для студента, инженера, фермера и грамотного слесаря, поскольку знания об электрохимической защите (ЭХЗ) возможно пригодятся им для антикоррозионной защиты своего личного автомобиля.

Инженер-проектировщик и студент-дипломник познакомятся в книге с уникальными компьютерными программами, которые позволяют решать так называемую сетевую задачу, когда ищется распределение тока и потенциала в сложных переплетениях подземных коммуникаций города или промышленного предприятия и анализируется при этом работа взаимосвязанной системы одновременно действующих установок ЭХЗ. Здесь же впервые в обобщенном виде дается теория поля токов для сетевой задачи.

Множество примеров расчета, приведенных в книге, вселяет уверенность, что компьютерные программы успешно решают практически все важные задачи антикоррозионной практики. К ним можно отнести такие, как определение коррозионно-опасных зон, вычисление скорости язвенной коррозии, выбор параметров электрозащитных установок с расчетом поля тока и потенциала на любом криволинейном трубопроводе с раз-

ветвлениями и неоднородностями различного рода, определение оптимального количества установок ЭХЗ и оптимальной схемы их размещения при условии минимума капитальных и эксплуатационных затрат. Причем могут быть найдены оптимизационные схемы совместной защиты ряда разнородных сетей общими средствами ЭХЗ.

Программы даже выполняют сметно-финансовый расчет в соответствии в действующими нормами и прејскурантами и распечатывают проектно-сметную документацию.

В процессе обучения персонала предприятий предлагаемые компьютерные программы можно использовать как тренажеры. Так, например, можно ввести в компьютер действующую в данном микрорайоне схему ЭХЗ и проигрывать на такой модели различные варианты ее работы, меняя токовую нагрузку установок, местоположение анодных заземлителей, их количество, устанавливая перемычки, исследуя вредные влияния токов защиты на соседние незащищенные сооружения и т.д.

В книге, разумеется, не обойдены вопросы схемного и конструктивного устройства, монтажа и эксплуатации защитных установок различного рода, а также современные методы полевых измерений. В частности, продемонстрирован новый расчетно-полевой метод, дающий возможность определять величину удельного электрического сопротивления изолирующего покрытия трубопровода, причем в заданной точке трубопроводной сети и, разумеется, без вскрытия трубопровода.

Расчетно-полевой метод пригоден даже для определения величины плотности тока коррозии и защиты в заданной точке трубопровода.

Сетевая задача для трубопроводов мало чем отличается от сетевой задачи для арматурной сетки железобетонной конструкции, например, свайного основания здания. Поэтому представленная теория и описанные компьютерные программы позволят пользователю рассчитать токи коррозии и защиты всевозможных свайных опор, заземлений, обсадных колонн скважин и других сооружений, которые можно моделировать эквивалентной трубопроводной сетью.

Книга подготовлена на основе материала лекций, читаемых в *Волгоградской государственной инженерно-строительной академии* автором, который занимается теорией и практикой защиты трубопроводных сетей и других металлических сооружений уже более 45 лет. Компьютерные программы в его разработке прошли надежную проверку не только в учебном процессе, но и на производстве в двух десятках проектных и эксплуатационных организаций страны.

Пакет АРМ-ЭХЗ-6П рекомендован для применения Руководящим документом РД 153-39.4-091-01 «Инструкция по защите городских подземных трубопроводов от коррозии», подготовленным АКХ им. К.Д. Памфилова - головной организацией РФ по коррозии и защите трубопроводных сетей.

Первое издание книги разошлось чрезвычайно быстро. Автор не раз встречал свою книгу, перепечатанную на ксероксе. По просьбе своих читателей и имея ввиду информационный голод последних лет в этой области, автор посчитал своим долгом переиздать книгу, причем с существенной переработкой и дополнением.

1.

1.1.

, .
 :
 , “ ” ,
 , , -
 ?
 ?
 , , -
 -
 - corrodere .
 ?
 .
 .
 99,99% ,
 .
 (0,01%)
 , .
 .

www.enes26.ru

. ,
 - , -

 , .

 " , " -
 , - .
 - : .
 - ;
 - ()
 - 100 .

 , -
 . -
 , . -

 . -
 - , -
 . -
 - , (-
 ,) .
 -
 .

www.enes26.ru

- : , , .
 - - .
 - , .
 - .



:
 - , ' () ;
 - , .
 -



, -
 - , , ; :
 - , , ;
 - , , -
 . .

1.3.

, , .
 - , .
 . , ,
 20 .

40 ?

, -
 . , -
 , -
 . -
 - , -
 - , -
 . , -
 , -
 . -

1.3.1.

“ ’ ” , -
 , -
 , -
 , -
 . -
 , -
 , -
 . -
 , -
 , -
 , -
 . -
 , -
 , -
 , -
 . -
 , -
 , -
 . -
 , -
 , -
 . -
 , -
 , -
 . -

www.enes26.ru

Cl⁻ SO₄⁻.

(>11).

5...25

www.enes26.ru

160-170

www.enes26.ru

980 .

30-

100 .

1.3.3.

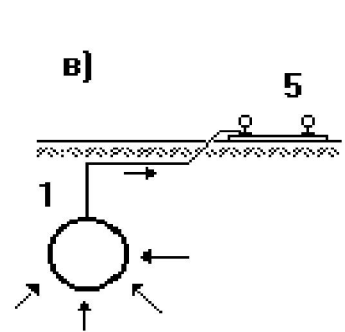
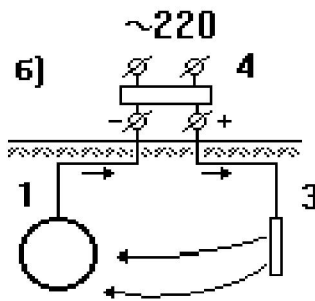
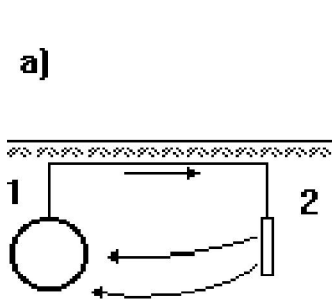
(,

?),
 100
 ()
) ;
) ;
) ;
) .

.1.1

1824 .

()
 1:100.



.1.1.

(), ()
 : 1 - ; 2 - ; 3 - ()
 ; 4 - ; 5 - -

,

.

-

,

.

()

,

,

.

-

-

(.1.1,).

-

-

.

,

.

-

,

.

1895 . No 538755,

,

,

,

,

,

-

.

1887 .

.

.

-

.

www.enes26.ru

,

-

,

.

,

,

-

,

.

.

-

-

-

,

“

”

,

,

”

.

“

”

,

.

1.3.4.

www.enes26.ru

0,1 / ,

20 / .

1.4.

() 9.101-78.
 9.602-89.
 51164-98.

1) / 153-39.4-091-01.
 , 2002.
 2) 106-78.
 3) . 1980.
 . 1 2. - .1986.
 4) .- .1984.

[1] [2].

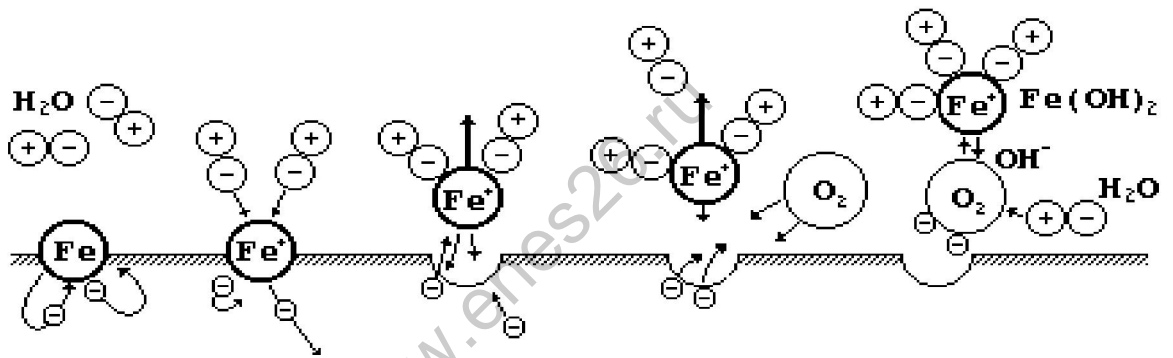
1.5.

1748 . 1773
. 1791 . - , - -
, - ,
, .
. , , , 1936 .
14 , -
. -
. -
. 27 .
. - 395
, , , ? ? -
. -
, , , ,
. : . -
, . -
. . 1812 . -
: -
, , , ,
:

www.enes26.ru

Fe⁺ -

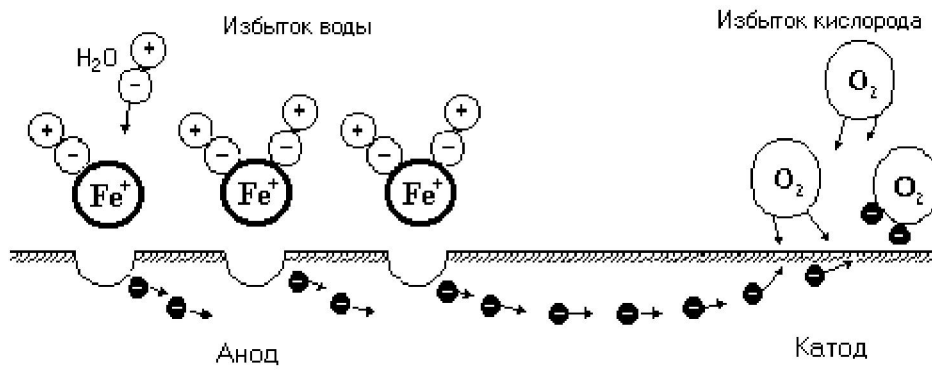
.2.1,



.2.1.

“ ”

“ ”,

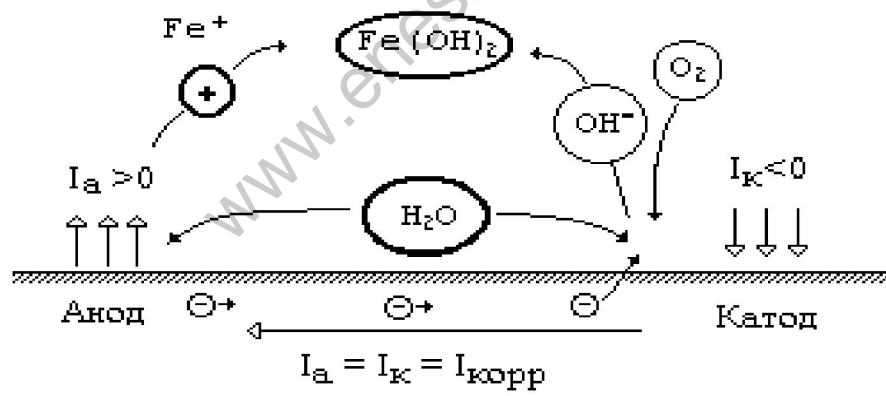


.2.2.

www.enes26.ru

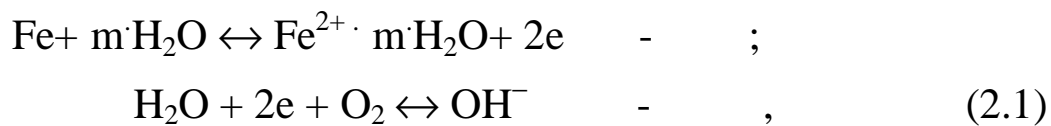
(2.3).

(!),



2.3.

, I - .

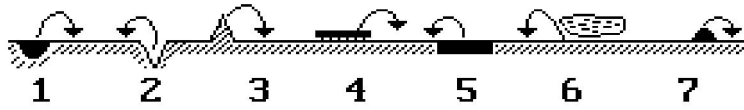


.. m ,
 - ,
 , , , -
 , , -
 . , -
 , -
 Na⁺, Mg⁺ , -
 , -
 ! H⁺ (-
 ,
 .. OH⁻ ,
 , Fe⁺⁺ ,
 OH⁻ ,
 Fe(OH)₂, Fe(OH)₃ Fe₂O₃, Fe₃O₄, -
 - .

2.2.2.

.2.4

1.
 (.2.4,1), , -
 , -
 , - .



.2.4.

; 2- , ; 3- ; 4- ; 5- ; 6- ; 7- .

“ ”

: ,

,

: $\varphi_{Fe} = -0,34$, $\varphi_{Cu} = +0,05$.

+1,42 .

$\varphi_{Au} =$

www.enes26.ru

2.

(.2.4, 2),

0,1...2 .

3.

4.

5.

6.

www.enes26.ru

pH = 7,

pH = 6,
0,06

-0,06

7.

,

-

-

,

-

,

.

-

-

.

-

,

,

.

“

”

.

-

.

,

,

.

-

-

,

-

.

-

2.2.3.

www.enes26.ru

-

-

-

.

.2.5

-

.

,

-

,

2.

1)

.2.5,1

.

,

-

,

,

-

,

-

,

,

-

.

2)

,

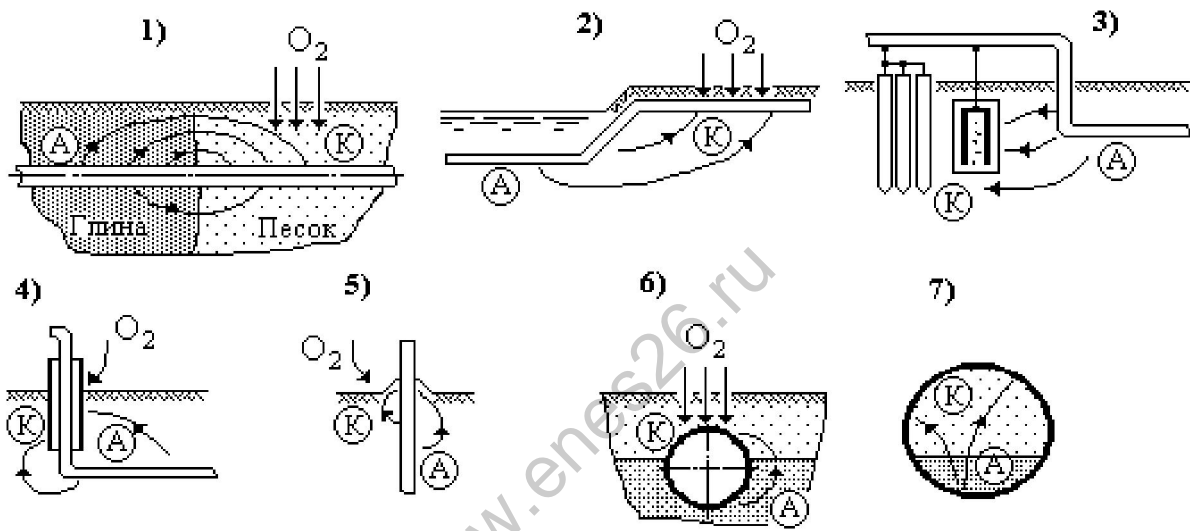
.2.5,2.

-

,

,

-



.2.5.

3)

” (.2.5,3).

(,)

4)

“ - ”

.2.5,4

www.enes26.ru

(,).

5)

()

- (.2.5,5).

6)

” , (.2.5,6).

7)

, , .2.5,7,

2.3.

www.enes26.ru

, , : - .

. , ,

,
 ,
 ,
 / 3 ,
 / 3 ,
 0.7 / .
 :
 .

20
1,145

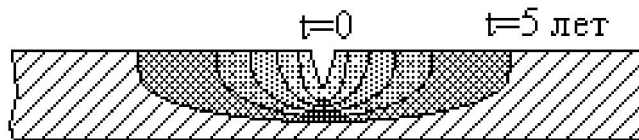
(80).

www.enes26.ru

₂S,

-
FeS,

.2.4, 4.



.2.6.

.2.6

www.enes26.ru

2.4.

I,

I

$$I = I_a = I$$

, ...

$$I = (\varphi - \varphi_0) / R, \tag{2.2}$$

I - , φ , φ - -
 (I = 0); R - -

(2.2),

R

$$I = Ae^{\eta/B}, \quad (2.3)$$

η - ; A, B -

$$R = \eta / I. \quad (2.4)$$

R ,

η -

$$\varphi - \varphi = \eta + \eta + \Delta U ; \quad (2.5)$$

$$I = (\eta + \eta + \Delta U) / (P / S + P / S_a + R), \quad (2.6)$$

η , η -

; ΔU -

; P , P -

, $\eta < 0$; S, S_a - , $\eta > 0$; R_c -

.2.7

(2.5)

(2.6).

$\eta < 0, \eta_a > 0.$

(

$\varphi - \varphi$)

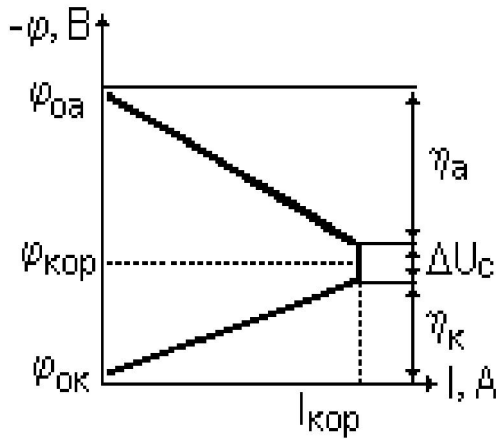
1)

(I),

($\eta > 0$), ..

$\eta < 0.$

www.enes26.ru



.2.7.

ΔU_c -

$= \varphi - \varphi - \dots$
 $, \eta, \eta,$

2)

φ ,

(ΔU).

3)

(φ_{oa}, φ),

I

φ .

I

φ .

4)

2.5.

2.5.1.

www.enes26.ru

$$G = qI ; \tag{2.7}$$

$$q = 3600 \cdot M / (nF),$$

G - ; q -

, $A^{-1} \cdot^{-1}$; M - ; F = 96500 -

, / ; n - ; I -

; T - , .

2), M = 56 / (n =

1,0424 $\cdot^{-1} \cdot^{-1}$ q = 9,12 / (.). q =

S,

$$j = I / S = G / (SqT), \quad (2.8)$$

$$j = \begin{cases} 0,95 v_1 \\ 0,85 v_2, \end{cases} \quad (2.9)$$

$j =$, / (2); $v_2 =$

, / 2 ; $v_1 =$

, / .

2.5.2.

($U \approx 10$).

$$R = U / I, \quad (I),$$

- ,
 .

- ,
 ,
 .

,
 ().

, -
 ,
 ,
 ,

“ ”

,
 .

.2.1.

www.enes26.ru

2.1

	/ ,	
1	0,001	
2	0,001...0,005	
3	0,005...0,01	-"-
4	0,01...0,05	
5	0,05...0,1	-"-
6	0,1...0,5	
7	0,5...1,0	-"-
8	1,0...5,0	
9	5,0...10,0	-"-
10	10,0	

/ , . . . 4-5. 0,01...0,1
 -
 6-8 , , 2...3 / ,
 20 / .
 10 .

3.

3.1.

www.enes26.ru

- ; -
 - ; -
 - ; -
 -

3.2.

9.602-89 “

- 1) (ρ);
- 2)

(P),

(2.5) (2.6),

$$I = E / R; \tag{3.1}$$

$$R = R + R + R ,$$

I - , - . . . , R -

R “ ”

(ρ)

www.enes26.ru

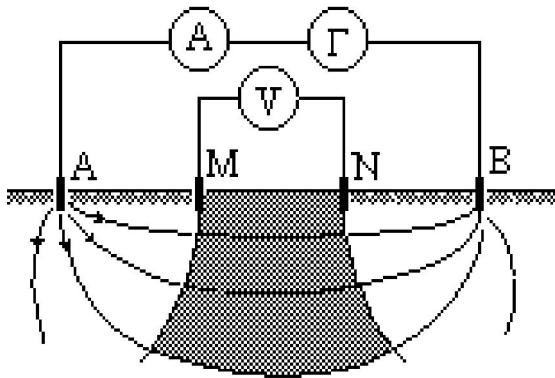
, R , ρ ,
 R , R -
 R . c -
 S - () , R · = P / S , -
 , - :
 (R) , R - -
 , -
 () -
 , -
 , R -
 , -
 , - ρ -
 , -
 . , -

3.2.1.

.3.1.

$$\varphi = I\rho / (2\pi r) , \quad (3.2)$$

φ - , ; I - , ; r - , ; ρ - ,



.3.1.

A,B -

, M,N -

www.enes26.ru

M N,

(3.2)

.3.1

M N

$$\varphi_M = I\rho [1 / (2\pi a) - 1 / (4\pi)];$$

$$\varphi_N = I\rho [1 / (4\pi a) - 1 / (2\pi a)], \tag{3.3}$$

$$U = \varphi_M - \varphi_N , \quad \rho$$

$$\rho = 2\pi aR, \quad R = U / I . \tag{3.4}$$

R,

(3.2)

« » ρ

M N ρ

AB/2 (.

.3.1).

(h)

= h .

= 2h ,

(3.5)

.3.2

« »

()

(ρ)

[].

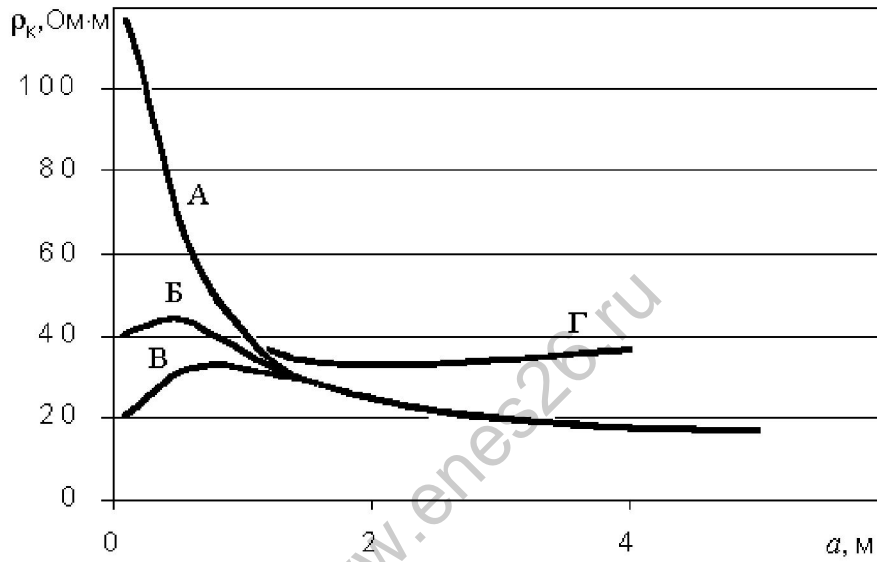
«EVSLOY»

-7.

.3.2

: $\rho_i = 120, 70, 40, 32, 27, 22, 21, 20, 18, 16, 15$.

$\rho_1 = 120$. ρ_1
 $= 40$. () $\rho_1 = 20$. () .
 0,2 .

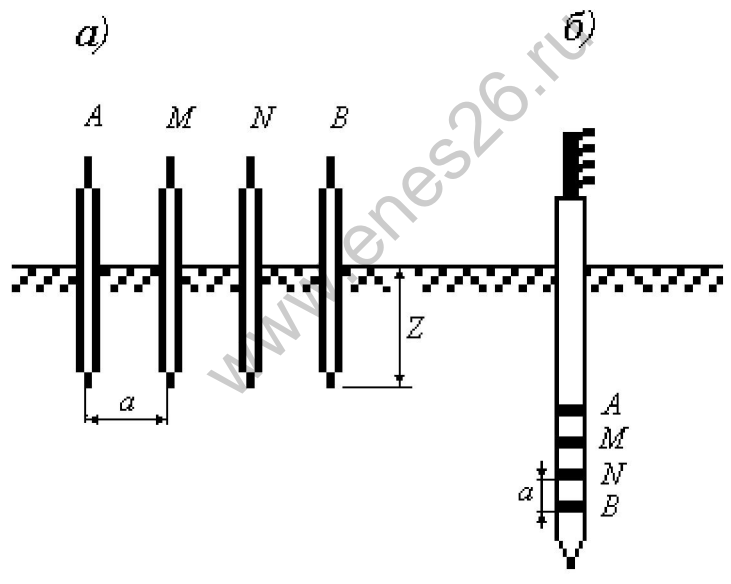


3.2. «
 ρ

$h = 1,5$, . . .
 $\rho_i = 20$. . .

3 , . . .
 $= 2h$.
 $= h$.
 (, .3.2)
 $i = 7, . . .$
 $= 2h$.

$\rho_i = 120, 70, 40, 32, 27,$
 $22, 20, 22, 30, 40, 45 \dots$ (h = 1,5)
 $\rho_i > 1,5$
 $\rho_i = 20$
 (.3.2,) . , -



.3.3.

.3.1

ρ

z.

< 0,5

3.1

z, м	$\rho, \text{ м}$			
	ρ_i	ρ		
		$= 1$	$= 0,5$	$= 0,25$
0,1	120	37,780	63,952	90,612
0,3	70	33,649	49,207	62,339
0,5	40	30,708	39,742	42,779
0,7	32	28,111	32,392	32,695
0,9	27	25,377	26,914	26,820
1,1	22	23,139	23,370	22,832
1,3	20	21,247	20,684	20,140
1,5	18	19,698	18,859	18,370

(3.4)

k,

.3.3,

$$\rho = 2\pi akU / I ;$$

(3.6)

$$k = 1 / (1/(2a) + 1/\sqrt{(2z)^2 + a^2} - 1/\sqrt{(2z)^2 + (2a)^2}) .$$

, $= 0,25$
 $k = 1,92.$

 $z = 0,5$.3.3, $\ll z$ $k = 2.$

2

9.602-89

2 .3.2:

3.2.2.

ρ .

$$R = P / S$$

S

(),

3.2

	ρ ,	j , / ² ,
	50	0,05
	20 50	0,05 0,2
	20	0,2

(10-40 .),

$$\Delta U = 0,1 = \text{const},$$

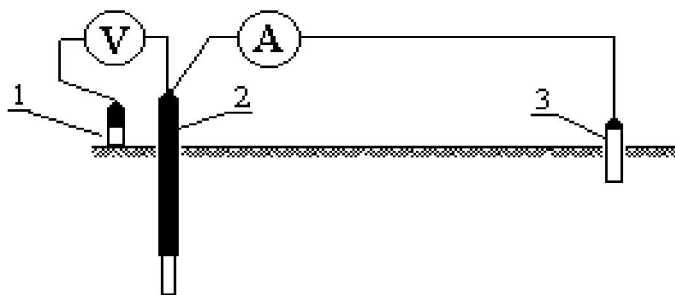
3 .3.3.

$$= \Delta U / j \quad (3.7)$$

$$\leq 0,5 \quad = 0,1 / j \quad \geq 2$$

www.enes26.ru

.3.4



.3.4.

1- ; 2 - ; 3 -

(2)

(3), -

(3.5),

.3.3

« » 1998-2000 .

3.3

	$\rho, \%$	$j / \%$		$\rho, \%$	$j, \%$
1	20,3	0,215	15	14,2	0,227
2	29,1	0,155	16	24,5	0,160
3	33,0	0,148	17	26,3	0,280
4	34,7	0,118	18	48,8	0,055
5	30,0	0,091	19	43,2	0,090
6	33,8	0,105	20	20,7	0,254
7	27,3	0,230	21	32,0	0,176
8	30,0	0,150	22	49,8	0,160
9	21,6	0,249	23	33,8	0,094
10	20,7	0,214	24	8,5	0,50
11	43,5	0,180	25	22,7	0,180
12	18,8	0,300	26	21,6	0,249
13	30,0	0,104	27	30,0	0,150
14	59,2	0,064	28	27,3	0,230

318 , 600 , ()
 $S = 5 \cdot 10^{-3} \cdot j^2$

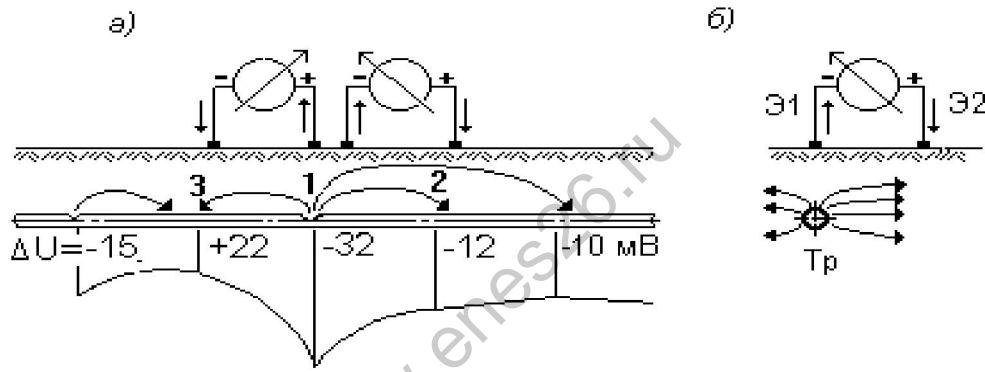
5

$\rho -$
 .3.2 .

3.3.

3.3.1.

.3.5



.3.5.

www.enescf6.ru

()

()

()

-

(

,)

, ... $\Delta U = 0$.

.3.5

“ ”

, ...

“+”,
($\Delta U > 0$),
“-”

“+”

.3.4,

$\Delta U > 0$, ..

“+”,

“-”.

1

3.

.3.4,

1

$\Delta U < 0$.
2.

1,

“ ”

“ ” (1)

.3.5, .

(.3.5,).

2.

1

2

.3.5, *

1 - *

1

2.

3.3.2.

, -

-

”

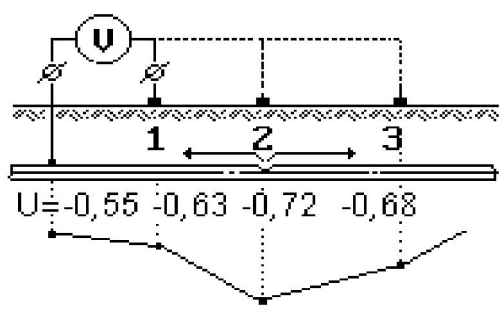
“

$$U = \varphi - \varphi + U, \tag{3.8}$$

U - ; φ -

φ - “ ” ; U -
 ()
 $\varphi = 0$ $\varphi = 0$.

φ (*) , “ ” - “ ”



.3.6.

.3.6,

(10...20)

”+”

U

$$U_{.1}, U_{.2}, U_{.3},$$

$$U_{.1} > U_{.2} < U_{.3}.$$

$$(3.6), \quad U = \text{const},$$

$$\varphi_1 - \varphi_1 > \varphi_2 - \varphi_2 < \varphi_3 - \varphi_3.$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3,$$

(
 $10^{-4} \dots 10^{-6}$

φ

$$\varphi_1 < \varphi_2 > \varphi_3.$$

2

“

2

”

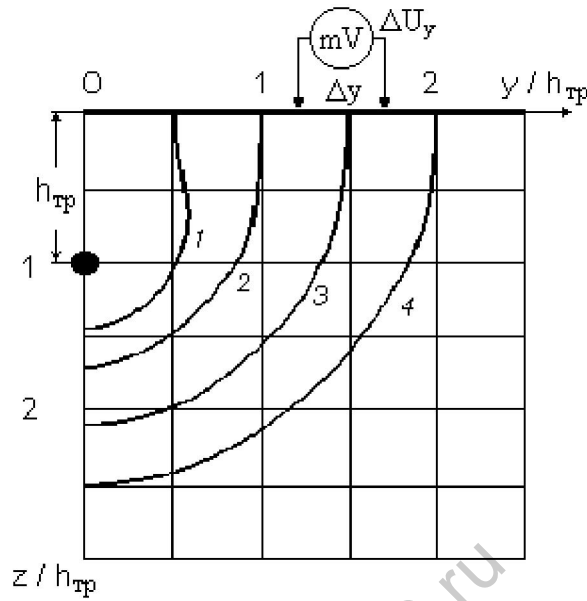
1 3;

, ... ,

1 3

3.3.3.

.3.7



3.7. $\rho_0 = 1 - 0,206; 2 - 0,197; 3 - 0,182; 4 - 0,163,$ $\rho_0 = 0$; x, y, z -

www.enes26.ru

$$j = E_y / \rho \tag{3.9}$$

$$= -\Delta U / \Delta y$$

; $\Delta U =$

; $\Delta y =$

$S_y,$
I ,
 ,

,
d
j .

(3.7),

$$\lambda/h = 2.$$

$$-7,$$

$$S_y = 10,35^2,$$

$$h = 1,5,$$

$$i_1 = 2,5 \quad i_2 = 3,5,$$

$$\Delta U = 11,3$$

$$\Delta = 1,$$

$$\rho = 10$$

(3.7)

$$I = j S_y = 11,7 \quad j = 1,13 / ^2,$$

$$d = 0,5,$$

$$(\Delta x = 1),$$

$$j = I / (\pi d^2) = 7,44 / ^2.$$

2-4

(2.9)

$$v_2 = j \cdot 10^{-3} / 0,85 = 8,77 \cdot 10^{-3} /$$

0,01

2-3

$$0,8 \dots 1,0 /$$

3.4.

6, -
 -7 ,
 7.
 L_1, L_2, \dots, L_N
 U
 $(U = U_1,$
 $U_2, \dots, U_N).$ $U \neq \text{const}$

j (\dots)
 $(\Delta L_1, \Delta L_2, \dots, \Delta L_N),$
 $i = 1, 2, \dots, N.$
 $\dots \Delta L_i = L_i - L_{i-1},$

$$\begin{aligned} (BA - E)j &= -B\varphi_c ; \\ R_j + \varphi_c &= U, \end{aligned} \tag{3.10}$$

$j -$; $R -$
 $; A -$,
 N ; $E -$; $\varphi_c -$ (-
 $)$; $U -$

$$\varphi_c \tag{3.10}$$

R ,
 $R = R_0$
 $\varphi_c = -0,5 \pm 0,2$.

(/). j -
 , ... ,

s

$$s = 0,02 \dots 0,2. \quad (3.10)$$

()

$$j = j / (\pi ds); \quad (3.11)$$

$$v = 1,18 j$$

$$d - \frac{j}{\rho} \quad (2.9).$$

3.8 (v)

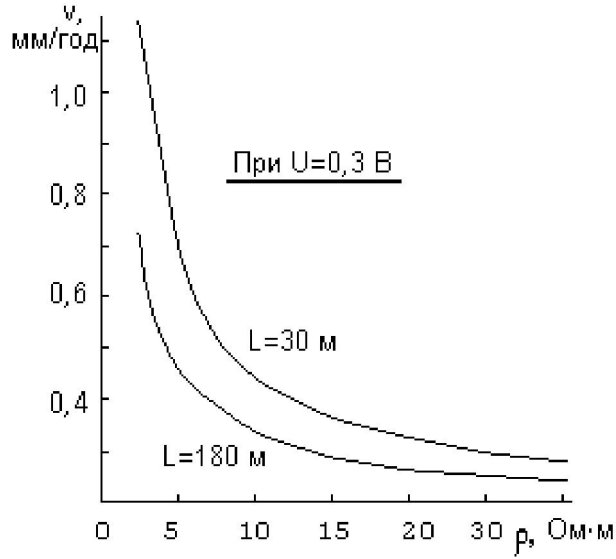
(L)

$$U = U_{max} - U_{min}, \quad (3.5)$$

U_{max}, U_{min} -

$$\rho < 20$$

$$\rho = 20$$



.3.8.

$$d = 0,2 \quad c$$

$$L$$

$$s = 0,12.$$

.3.9.

$(1/\rho)$,

(U) .

$U > 0,3$

$R > 150$

$U < 0,05$

$R < 10$

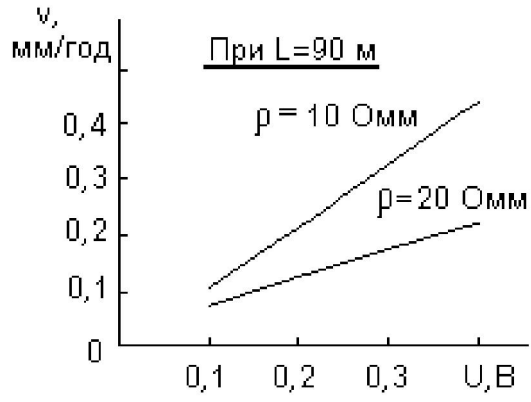
$U < 0,05$

$= 0,2 \pm 0,05$ $L = 50 \pm 20$,

$\rho = 20$.

$v = 0,15 \dots 0,2$ / .

$v = 0,01 \dots 0,03$



.3.9.

-
L

- -7

3.5.

www.enes26.ru

(R).

- -7 .

3.5.1.

()

(R .).

R . () :

, I , ;

, S . ²;

, ΔU . , .

R . = ΔU . S / I , . ². (3.12)

3.5.2.

R .

:

, U ;

U ;

U ;
 , ρ .
 =3
 " " .
 R_i $i = 1, 2, \dots, N$,
 N -

3.5.3.

R R -

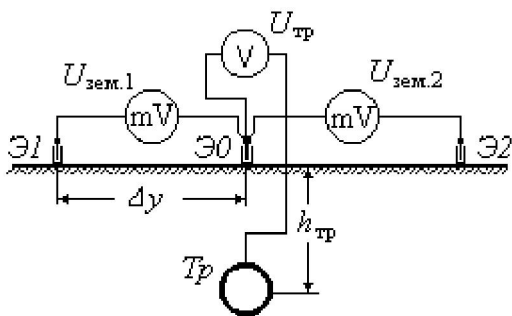
3.5.2.

www.enes26.ru

h d () .

.3.10.
 -
 0

Δy $2h$.



.3.10.

$$U'' = (U''_{.1}, U''_{.2}), \quad U' = (U'_{.1}, U'_{.2}, U'_{.3}).$$

$$\Delta U_{.1} = U''_{.1} - U'_{.1}, \quad \Delta U_{.2} = U''_{.2} - U'_{.2}.$$

$$\Delta U = (\Delta U_{.1} + \Delta U_{.2}) / 2, \quad (3.13)$$

$$j = \Delta U / (\rho d), \quad / ^2, \quad (3.14)$$

C -

C = 12,4.

R

$$R = \rho d \Delta U / (\Delta U), \quad \Delta U = (U'' - U') \quad (3.15)$$

24

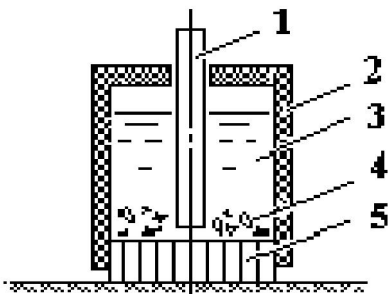
1 (),

.3.11.

CuSO₄,
5,

4

www.enes26.ru



.3.11.

1 - ();
 ; 2 -
 ; 3 -
 CuSO₄; 4 -
 ; 5 -

15 . 1 , -
 - , -

3.5.2.

, ,
 , .
 , ,
 , ,
 , 10 ,
 .3.5). (

1 , .

,
 ,
 .

www.enes26.ru

4.

4.1.

www.enes26.ru

· , -
, , , -
· -
· , -
, , , -
, () -
· , -
, , -
(), -
· -
· , -
, , -
· , -
· , -

“ ”

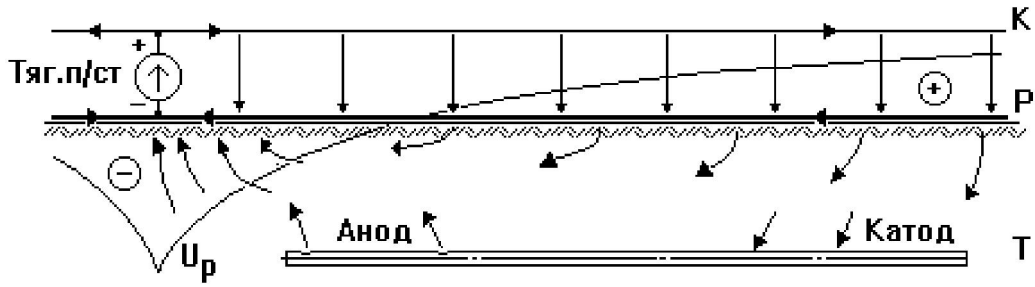
24

www.enes26.ru

4.1.1.

.4.1

“ ”



.4.1.

www.enes26.ru

$$U = \varphi - \varphi + U_{c.}, \quad (4.1)$$

U - ; φ, φ - “ ” ; U -

$$\varphi = 0, \varphi = 0 \quad U = U_{c.}$$

$$U_{c.} = -0,55 \quad U_{c.} = 0 -$$

$$U = U_{c.} = 0.$$

$$U > 0, \dots$$

$$(4.1) \varphi > \varphi,$$

$$U = \varphi - \varphi = 0 \quad \varphi = \varphi$$

$$U > 0$$

$$U < 0 -$$

“ ”

10

$\pm 0,1$,

U

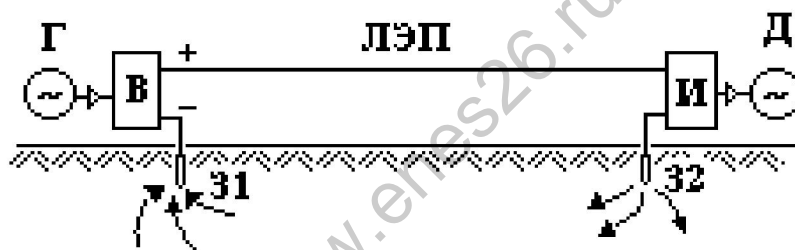
10%

1% ,

U = 1 ...

4.1.2.

“ - ” .4.2.



.4.2.

, 1, 2 -

(),

()

().

(1, 2) -

4.2.

.4.1,

(.4.3).

“-” -

 ΔU

$$\Delta U = \varphi - \varphi , \quad (4.2)$$

(φ) (φ),

U

$$U = \Delta U + U , \quad (4.3)$$

U -

(4.2) $\Delta U > 0$
 (),

$\varphi > \varphi$ (“ ” “+”,
 .4.3 “ ” “-”.

1 (.4.3)

3...5

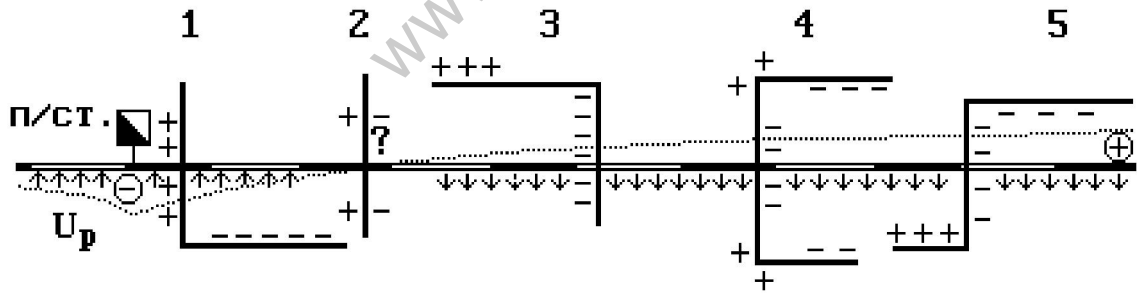
(U < 0),

$\varphi > \varphi$ () “ ”,

.4.3,3

(U > 0) “

$\varphi > \varphi$ (



.4.3. (+) (-)

U_p

2 (.4.3),

($U_p = 0$).

(,),

($\varphi = \text{const}$),

$\varphi = 0$.

(4.2)

$\Delta U = \text{const}$,
 $\Delta U = 0$.

($\Delta U = \text{const} > 0$)

($\Delta U = \text{const} < 0$).

4.3.

4.3.1.

www.enes26.ru

5...10)

(

10...15

“ ”

()

$$U = U = -0,55 \text{ .}$$

$$U = -0,75 \text{ ,}$$

$$-0,35 \text{ (}$$

$$\Delta U < 0 \text{ ,}$$

$$(4.2) \varphi < \varphi \text{ , . .}$$

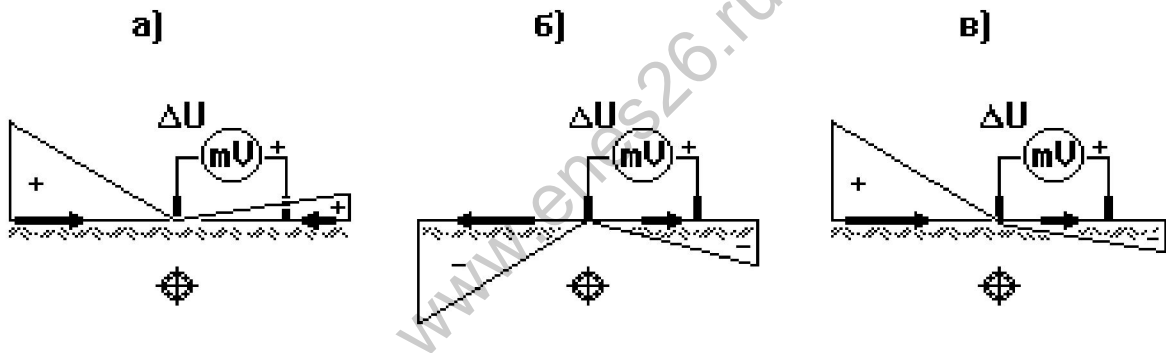
U

$$U = -0,55 \text{ .}$$

4.3.2.

U . 4.4

“+” “-”
 ΔU (-), “ ”
 “+” “-” () “-” “+” ()
 “ ” () - ,
 .4.4.



.4.4.

(), ()
 ()
 :
 “ -
 -
 -
 -
 ΔU
 (,
 .4.4,), ΔU

“ ”

$$(\Delta U_1 \quad \Delta U_2),$$

$$\Delta L = 20 \dots 100 \quad .$$

$$\Delta U_1 \quad \Delta U_2$$

$$\Delta U ($$

j).

“+”

$$\Delta U_1 \quad \Delta U_2$$

, : 1)

“ ”; 2)

j

4.4.

www.enes26.ru

10

(U)
 U_i 5 10
 ΔU

$$U = \sum_{i=1}^n U_i / n ; \quad (4.6)$$

$$\Delta U = U - U ,$$

n -

$$\Delta U < -10 ,$$

).

0,3 (

4.5.

:

;

;

() . R , $R < 20$; $R > 200$; $R > 500$; $R > 1500$.

$R \rightarrow 0$ $R \rightarrow \infty$.

R c / (/) .

; ; .

, - , :

- (, -
 , ,
 70 ²);
 - (150
);
 - (300
).

.
 ,
 .
 (.4.1), ()
 (+)
 ,
 ,
 U ,
 U , +10...+20 , -5... -10
 , ... 15...30 .
 .
 (R → 0).
 ,
 , (U = 0).
 .

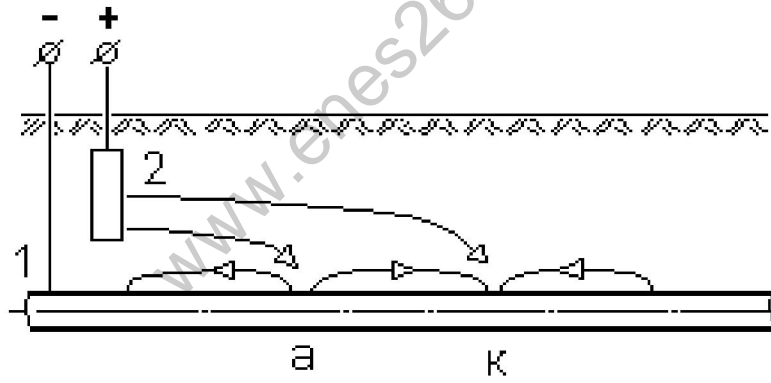
, ,
 - ,
 , 2000 ;
 - , “ - ” -
 , ;
 ;
 - “ - ”.
 1...3 . 25 .
 . L = 1000
 U = +10 .
 R = 50 .
 j = U / R = 0,2 / ,
 , I = 200 . 10%
 186 . ,
 , .
 - -6 -
 -7 .

www.enes26.ru

5.

5.1.

.5.1),



.5.1.

1- ;
2- .

(.5.1),

2.

“ ”

“ ”

,

.

.

,

,

,

.

.

.

,

,

-

, . . .

,

.

:

1.

5.2.

:

,

.

U

j

www.enes26.ru

$F(j)$, $U =$

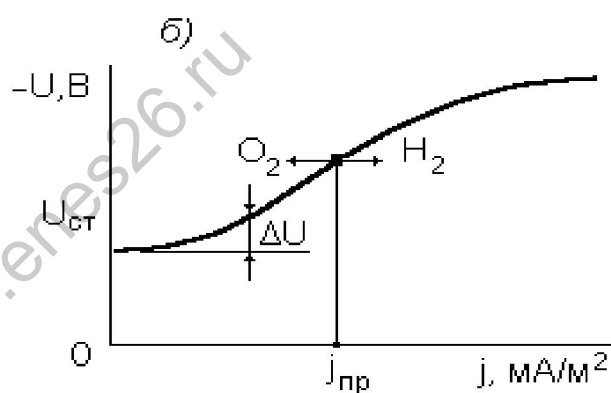
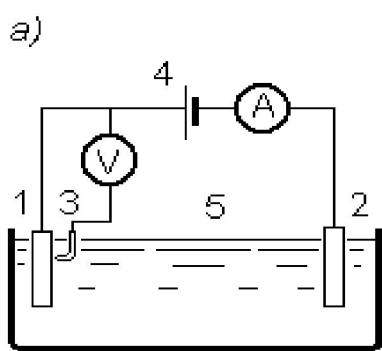
.5.2

1

2.

3

U ,



.5.2. () -
():
1- ; 2- ; 3- -
; 4- ; 5-

ΔU

U .

$\Delta U = Pj$.

.5.2 2 - 2 , -

j , -
 $j < j$, -
 $j > j$, -
(2.1).

$$2^{+} + 2 \rightarrow 2, \quad (5.1)$$

5.3.

www.enes26.ru

j .min;
 ΔU .min;
 U .min ;
 U .max .

20...150 / 2.

5.3.2.

U, j, j, ΔU, j,

$$\Delta U_{\text{min}} = -0,059 \lg(j / j), \quad (5.3)$$

ΔU_{min} - ; j -

100 , . . .

j / j = 100,

$$\Delta U_{\text{min}} = -0,059 \lg 100 = -0,118$$

$$\Delta U_{\text{min}} = -0,018 \quad !$$

(5.3)

$$\Delta U_{\text{min}} = -0,02$$

$$\Delta U_{\text{min}} = -0,1$$

NACE (H

-)

$$\Delta U_{\min} = -0,1$$

$$\Delta U_{\min} = -0,3$$

www.enes26.ru

$$\Delta U_{\min} = \Delta U_{\min} + \Delta U_{\min} \tag{5.4}$$

$$\Delta U_{\min} = -0,3 \quad , \quad \Delta U_{\min} = -0,1 \quad ,$$

$$\Delta U_{\min} = -0,2 \quad .$$

5.3.3.

$$= -0,85 \quad (\quad , \quad U_{\min}) .$$

1928 .

60-

www.enes26.ru

“ ” ,

$$\Delta U_{\min} = -0,1 \quad U ,$$

$$U_{\min} = \Delta U_{\min} + U \quad (5.5)$$

U
(-)

$$U = -0,4 \dots -0,75 \text{ ,}$$

$$U_{\text{.min}} = -0,5 \dots -0,85 \text{ .}$$

$$U_{\text{.min}} = -0,85$$

$$U \approx \text{const.}$$

$$U_{\text{.min}} = -0,75 \text{ ,}$$

$$U_{\text{.min}} = -0,85 \text{ .}$$

www.enes26.ru

.5.1.

$$U_{\text{.min}} = -0,95 \dots -1,2$$

9.602-89

$$\Delta U_{\text{.min}}$$

$$\Delta U_{\text{.min}} = -0,1 \text{ ,}$$

5.1

$U_{\text{.min}} \text{ ,}$	
-0,85	
-0,9	
-0,95...-1,2	

5.3.4.

U .min. , U .max, . . . -
 , . , -
 (. .5.1)
 , , - . -
 , , -

9.602-89

U .max = -1,15 ,

).

U .max = -2,5 .

51164-98

U .max = -2,5 ,

U .max = -3,5 -

U .max

- .
 , , -
 , , .
 , , -
 , .

.5.3,

$U_{\text{max}} = -1$ () .

-1,2 ,

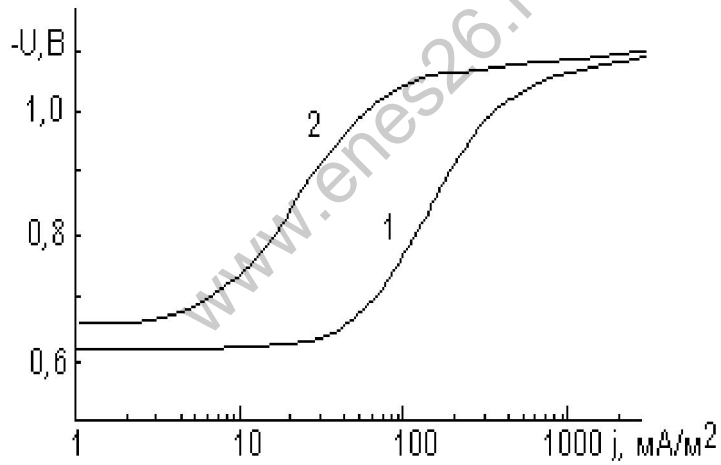
$10 \text{ / } ^2$.

-1,15...

$U_{\text{max}} = -1,2$,

-4 ,

$U_{\text{max}} = -1,5$...



.5.3.

(1)

(2).

($U_{\text{max}} = -1,15$) .

U_{max}

5.4.

ΔU .

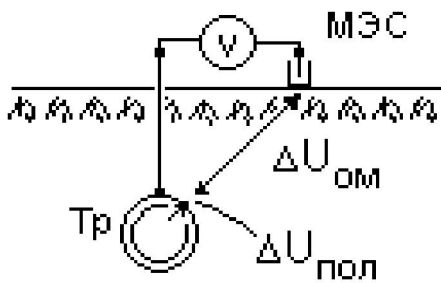
U ,

$$U = U + \Delta U + \Delta U , \quad (5.6)$$

ΔU

, ΔU -

(5.4).



5.4.

- ΔU ΔU

() .

ΔU

ΔU

, ...

$$\Delta U = \Delta U + \Delta U . \quad (5.7)$$

ΔU

ΔU

ΔU :

www.enes26.ru

ΔU

ΔU

5.5

1

2,

, ... ΔU

ΔU

4

2

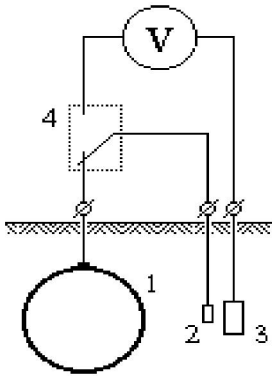
”

0,2...0,5

“

”

5...10



.5.5.

1 -
 ; 2 -
 ; 3 -
 ; 4 -

)
 1,2,...,n).

U_i

3 (-
 5 10 -
 U_i ($i =$

U ,

$U = \Delta U +$

$$U = 1/n \sum_{i=1}^n U_i, \quad (5.8)$$

n -

5.5.

6.

$$j = (BA - E)^{-1} (J - B\varphi), \quad (5.9)$$

U, j, \varphi, J

$$\begin{aligned} \Delta U &= R j; \\ R &= R_1 + R_2; \\ \Delta U &= R_1 j, \Delta U = R_2 j, \end{aligned} \quad (5.10)$$

R, \Delta U, R_1, R_2

\Delta U / j, (5.9), j, R

1

d = 300
 \rho = 40

$$U = -0,55 \cdot 100 = -55$$

.5.2

(R = 10), .5.3 -

(R = 100).

$$s = 0,04, \quad - 10$$

- -6 -

, ...

$$U \leq U_{\min} =$$

- 0,85 .

5.2

nn	$j, / 2$	$j, /$	$, 2$	R ,	$\Delta U ,$	$\Delta U ,$	U ,	U' ,
1	1760	70.385	0.341	9.363	-0.600	-0.704	-1.854	-2.625
2	491.2	19.649	0.636	15.769	-0.313	-0.196	-1.059	-1.217
3	364.4	14.576	0.668	16.420	-0.243	-0.146	-0.939	-1.061
4	321.8	12.871	0.689	16.891	-0.222	-0.129	-0.900	-1.009
5	300.6	12.026	0.700	17.125	-0.210	-0.120	-0.881	-0.983
6	288.7	11.550	0.694	17.086	-0.201	-0.116	-0.866	-0.964
7	282.3	11.294	0.691	17.036	-0.195	-0.113	-0.858	-0.955
8	280.0	11.200	0.690	17.018	-0.193	-0.112	-0.855	-0.951
9	281.4	11.258	0.691	17.029	-0.194	-0.113	-0.857	-0.954

5.3

nn	$j, / 2$	$j, /$	$, 2$	R ,	$\Delta U ,$	$\Delta U ,$	U	U' ,
1	545.4	2.182	0.628	156.4	-0.343	-0.218	-1.111	-1.140
2	331.8	1.327	0.684	169.2	-0.227	-0.133	-0.910	-0.920
3	298.7	1.195	0.699	172.9	-0.209	-0.119	-0.878	-0.888
4	287.9	1.152	0.694	172.3	-0.200	-0.115	-0.865	-0.867
5	282.7	1.131	0.691	171.7	-0.195	-0.113	-0.859	-0.868
6	279.6	1.119	0.690	171.4	-0.193	-0.112	-0.854	-0.864
7	277.9	1.112	0.689	171.2	-0.191	-0.111	-0.853	-0.862
8	277.6	1.110	0.689	171.2	-0.191	-0.111	-0.852	-0.862
9	279.0	1.116	0.689	171.3	-0.192	-0.112	-0.854	-0.864

$$I = 20,0 \text{ R} \quad I = 1,3$$

() (\cdot^2),
 1 .5.4,

5.4

j / 2	, . 2			
	1	2	3	4
50	0.3	0.3	0.5	0.8
75	0.4	0.5	1.2	2.5
100	0.5	0.7	2.1	3.1
150	0.6	1.1	2.5	3.3
200	0.65	1.2	2.2	3.1
300	0.7	1.1	1.7	2.1
400	0.65	1.0	1.2	1.3
600	0.62	0.8	0.8	0.8
800	0.62	0.7	0.7	0.7
1000	0.6	0.6	0.6	0.6

(2, 3, 4)

4
30

$$j > 1000 \quad .5.4 \quad / 2$$

$$= 0,6 / j \quad (5.11)$$

1.

2. $\rho = 40$
 $\rho.$

3. $\Delta U / \Delta U = 1,7.$ $\rho = 20$
 $\Delta U / \Delta U = 5,9.$

U ΔU
 $9.602-89$ $U_{max} = -1,15$
 $U = -0,55$
 $1 U = -0,55 - 0,6 = -1,15$

$\Delta U + \Delta U = -1,854$

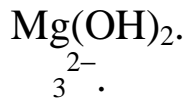
4. U'
 $\Delta U = -2,625 + 0,55 + 0,6 = -1,475$

(.5.1).

ΔU $-0,1$
 100

5.6

5.6.1.



www.enes26.ru

Pj .

ΔU

(j)

ΔU

=

www.enes26.ru

2

$$I = 20,0 \cdot 1,$$

() ,

.5.3,

$$\binom{4}{1}$$

, 4

- , 1,

.5.5.

5.5

NN	1		2		3		4	
	j , / 2	ΔU , B	j , / 2	ΔU , B	j , / 2	ΔU , B	j , / 2	ΔU , B
1	1760	-0.600	1814	-0.600	1857	-0.600	1885	-0.600
2	492	-0.313	475	-0.439	491	-0.500	510	-0.523
3	365	-0.243	353	-0.369	346	-0.509	345	-0.600
4	322	-0.222	313	-0.340	299	-0.510	290	-0.638
5	301	-0.210	294	-0.325	279	-0.503	265	-0.649
6	289	-0.201	283	-0.315	267	-0.498	252	-0.650
7	283	-0.195	277	-0.310	261	-0.494	245	-0.649
8	281	-0.193	274	-0.308	258	-0.493	241	-0.648
9	282	-0.194	276	-0.310	257	-0.494	241	-0.648

.5.5

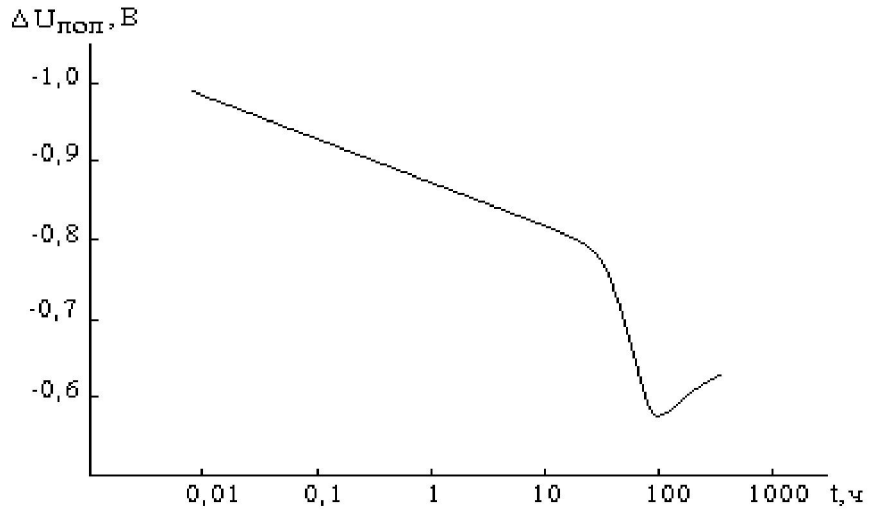
$j < 300$ / 2).

$\Delta U = j$

(. 5.11).

.5.6

.5.5.



.5.7.

200 / ².

500

.5.7

[1].

10

www.enes26.ru

’ . - ’ -
’ -
-

www.enes26.ru

6.

6.1.

6.1.1.

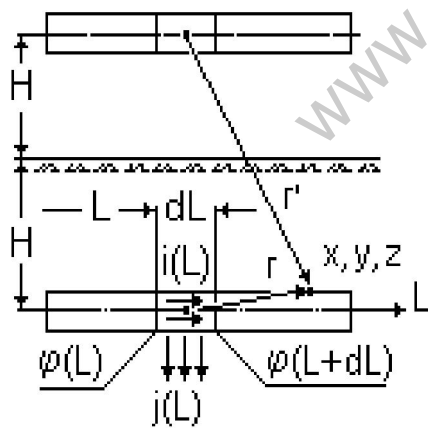
) . () (-
, , -
, , -
.
,
:
- ;
- ;
- .
1) : (- , -
) ;

www.enes26.ru

- 2) (, ,) ;
- 3) (, ,) .

6.1.2.

L ΔL (.6.1).



$\varphi(L) - \varphi(L + \Delta L) -$

$i(L) = (\varphi(L + \Delta L) - \varphi(L)) / (R \Delta L),$

$i(L)$ - ΔL ; R - $i(L) = -1/R \cdot d\varphi(L) / dL$, (6.1)

“-“ , $(i > 0)$ - $(d\varphi < 0)$. dL . $di(L)$, ...

$$j(L) = -di(L) / dL, \quad (6.2)$$

$j(L)$ - , / . , , , $di < 0$, . . . $j > 0$ “-“ . (6.1) (6.2)

$$j(L) = 1/R \cdot d^2\varphi(L) / dL^2. \quad (6.3)$$

$$R \cdot j(L) = \varphi(L) - \varphi(L) - \varphi(L), \quad (6.4)$$

R - , ; φ - - ; φ - (6.4)

, ...

$$\Delta U = R \cdot j \tag{6.5}$$

$$\Delta U = R \cdot j \cdot \varphi \tag{6.4}$$

U .

U

φ = U .

$$\varphi = U \cdot j \tag{6.4}$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \tag{6.6}$$

φ . -

(φ)

)

(“+” -

),

,

$$\varphi = I\rho / (4\pi r), \tag{6.7}$$

$\varphi -$

; I -

; r -

;

$\rho -$

$$\varphi = I\rho / (4\pi) (1 / r + 1 / r'), \tag{6.8}$$

$r' -$

()

(r = r'),

www.enes26.ru

$$\varphi = I\rho / (2\pi r). \tag{6.9}$$

$$r > 2L, \quad L'$$

)

L -

$$j = I/L -$$

$$jdL$$

$$j = \text{const},$$

$$\varphi = j\rho / (4\pi) \int_0^L (1/r + 1/r') dL, \tag{6.10}$$

r - ; r' - (.
 .6.1).

)
 , (6.10), , -

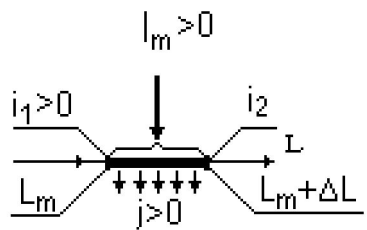
$$\varphi = \rho / (4\pi) \int_{(L)} j(\xi) G(\xi, x, y, z) d\xi; \tag{6.11}$$

$$G(\xi, x, y, z) = 1 / r(\xi, x, y, z) + 1 / r'(\xi, x, y, z),$$

r - ξ -
 x, y, z ; r' - , -

6.1.3.

)



.6.2.

$$L = L_m \quad I_m, \quad I_m \quad \Delta L$$

.6.2

 ΔL L_m

$$i_1 - i_2 + I_m - j\Delta L = 0 \quad (6.12)$$

$$j = -(i_2 - i_1) / \Delta L + I_m / \Delta L. \quad (6.13)$$

$$j(L) = -di(L) / dL + \delta(L_m, L) I_m$$

$$j(L) = (1 / R) d^2\varphi(L) / dL^2 + \delta(L_m, L) I_m \quad (6.14)$$

$\delta(L_m, L)$ -
 L_m
 :

$$\begin{aligned} \delta(L_m, L) &= 0 & L \neq L_m; \\ \delta(L_m, L) I_m &= J_m & L = L_m, \end{aligned}$$

$$J_m = I_m / \Delta L_m - \Delta L_m.$$

 J_m

(6.1),

$$i(L) = \begin{cases} -1 / R \quad d\varphi(L) / dL & L < L_m \\ -1 / R \quad d\varphi(L) / dL + I_m & L \geq L_m \end{cases} \quad (6.15)$$

$i(L)$

)

$$(I_m = 0),$$

$$i(L) = d\varphi(L) / dL = 0 \quad L = L_g, \quad (6.16)$$

L_g -

$$i(L_g) = 0.$$

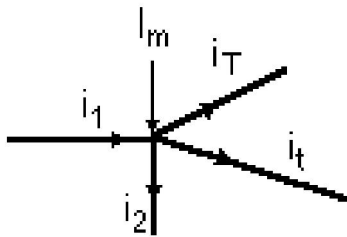
)

$$L = L_m,$$

$I_m,$

$$R_{.t} (t = 1, 2, \dots, T), \quad (6.3).$$

www.enes26.ru



.6.3.

$$i_1 - (i_2 + i_3 + \dots + i_T) + I_m - j\Delta L = 0; \quad (6.17)$$

$$\Delta L = (\Delta L_1 + \dots + \Delta L_t + \dots + \Delta L) / 2,$$

$\Delta L_t / 2$ -

t-

c

; ΔL -

, $= 2$ (6.17) (6.12) -

(6.17) ΔL , $= 1 -$ (6.14) -

$j(L) \varphi(L)$ -

$j(L) - 2 / \sum_{t=1} (1 / R_{.t}) d^2 \varphi(L_t) / dL_t^2 = \delta(L_m, L) I_m$, (6.18)

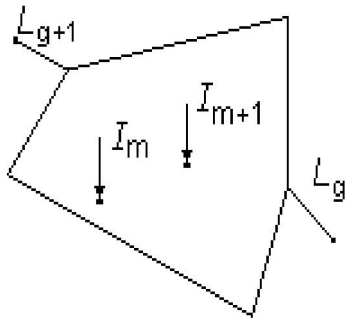
Σ

L.

6.1.4.

(.6.4)

www.enes26.ru



.6.4.

$I_m -$, $L_g -$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\text{из}}(L)j(L) + \rho / (4\pi) \int j(\xi) G(\xi, L) d\xi - \varphi_T(L) = -\varphi_3(L) - \varphi_{\text{ст}}(L); \\ j(L) - \frac{2}{T} \sum_{t=1}^T \frac{1}{R_{\text{прт}}} \frac{d^2 \varphi_T(L_t)}{dL_t} = \delta(L_m, L) I_m; \\ d\varphi_T(L) / dL = 0 \quad \text{при } L = L_q. \end{array} \right. \quad (6.19)$$

$$(6.6) \quad (6.11), \quad (6.18), \quad (6.19), \quad (6.19), \quad (6.16), \quad (6.4),$$

6.2.

6.2.1.

www.enes26.ru

xOy

Oz

()

$$\begin{aligned}
 & \Delta L_{ik} \quad i- \quad k- \\
 & (R_{.ik}), \\
 & (U_{c.ik}), \\
 & (R_{.i}, R_{.i}, U_{c.i}), \\
 & \Delta L_i \quad i- \\
 & (\quad .
 \end{aligned}
 \tag{6.17)$$

$$\Delta L_i = (L_{i1} + L_{i2} + \dots + L_{it}) / 2, \tag{6.20)$$

t- ; L_{it} -
 i- (t = 1,2,...,T).

“ ”
 dL, ΔL_{ik} “ ”, . . .

www.enes26.ru

40-

· · · , · · · , · · · , · · · , · · ·

, . . .

6.2.2.

(6.19)

$$\begin{cases} R_{нзi} + \sum_{k=1}^N a_{ik} j_k - \varphi_{\tau i} = -\varphi_{zi} - \varphi_{cti}, & \text{при } i=1,2,\dots,N; \\ j_i - 1 / \Delta L_i \sum_{t=1}^{T_i} (\varphi_{\tau it} - \varphi_{\tau i}) / (\Delta L_{it} R_{прit}) = \delta_i I_m, & \delta_i = \begin{cases} 1 & \text{при } i=m; \\ 0 & \text{иное.} \end{cases} \end{cases} \quad (6.21)$$

N- ; T_i - i- ; j_i - -
 i- ; φ_i - i- ;
 φ_{it} - t- , i- ; ΔL_{it} -
 i- t- (); ΔL_i -
 i- ; R_i - ;
 φ_i - ; φ_{ci} - ; R_{it} -
 ; m - I_m;
 a_{ik} - , k-
 i-

$$a_{ik} = \rho / (4\pi) \sum_{t=1}^{T_k} \int_0^{L_{kt}/2} G_{ikt} d\xi \quad (6.22)$$

k- , G_{ikt} (6.11). , t- -

$$\begin{aligned} G_{ikt} &= 1 / \sqrt{r^2 + (z_k - z_i + d_i/2)^2} + 1 / \sqrt{r^2 + (z_k + z_i + d_i/2)^2}; \\ r^2 &= (x_k + \xi \cos \theta_{kt} - x_i)^2 + (y_k + \xi \sin \theta_{kt} - y_i)^2; \end{aligned} \quad (6.23)$$

$$\theta_{kt} = \arctg (y_k - y_t) / (x_k - x_t),$$

x_s, y_s, z_s - s - $(s = i, k, t)$; d_i - i - k - i - k - i .

6.2.3.

(6.21)

$$\begin{aligned} A_j - \varphi &= -\varphi - \varphi_c; \\ j - B\varphi &= -J, \end{aligned} \tag{6.24}$$

$= \{A_{ik}\}_N$,

$$A_{ik} = \begin{cases} a_{ik} + R_i & i = k; \\ a_{ik} & ; \end{cases} \tag{6.25}$$

$i, k = 1, 2, \dots, N$ -

(6.24) B - ,

$\{B_{ik}\}_N$:

$$B_{ik} = \begin{cases} -1 / (\Delta L_i \sum_{t=1}^{T_i} 1 / (\Delta L_{it} R_{\text{np}it})) & - \text{при } k = i; \\ 1 / (\Delta L_i \Delta L_{it} R_{\text{np}it}) & - \text{при } k = it; \\ 0 & - \text{остальное.} \end{cases} \tag{6.26}$$

$$\{ \varphi_i \}_N \quad (6.24) \quad J = \{ J_i \}_N,$$

$$J_i = \begin{cases} I_m / \Delta L_i & i = m; \\ 0 & \end{cases}$$

$$I_m \quad (6.19), \quad (6.26)$$

www.enes26.ru

$$(6.24) \quad \varphi,$$

$$(BA - E)j = J - B(\varphi + \varphi_c), \quad (6.27)$$

$$E - N \times N,$$

$$(6.27)$$

j.

$$(6.27)$$

$$j = (BA - E)^{-1} (J - B\varphi - B\varphi_c), \quad (6.28)$$

$$(BA - E)^{-1} \cdot \dots, \dots$$

$$j$$

$$U = R \cdot j + \varphi_c \quad (6.29)$$

www.enes26.ru

$$\varphi_c = \hat{j} \quad (6.30)$$

φ_c - , (6.7); $' = \{a_{ik}\}_{N \times N}$ (6.22); j - (6.27).

$$\varphi_c = \sum_i a_{ij} \varphi_j \quad (6.24)$$

$$(AB - E) \varphi = AJ - \varphi - \varphi_c, \tag{6.31}$$

φ

$$\varphi = (AB - E)^{-1} (AJ - \varphi - \varphi_c). \tag{6.32}$$

)

R ,

-

U ΔU -

-

c , ...

$$= \{A_{ik}\}_N,$$

$$\tag{6.25},$$

R .

$$\tag{6.24}$$

$$(\varphi_c = U):$$

$$A' j + R j - \varphi = -\varphi - U, \tag{6.33}$$

A' -

$$\tag{6.30}.$$

$$U = \Delta U + U$$

$$\Delta U = R j, \tag{6.24}$$

$$A' j - \varphi = -\varphi - U;$$

$$j - B\varphi = -J. \tag{6.34}$$

j

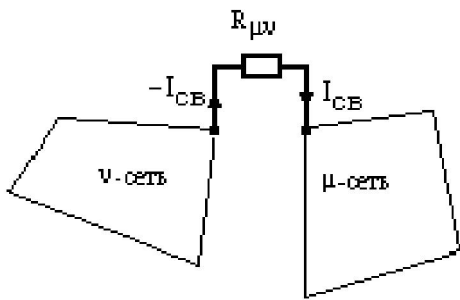
$$(BA' - E)j = J - B(\varphi + U), \tag{6.35}$$

R

$$R = \Delta U j^{-1}. \tag{6.36}$$

6.3.2.

.6.5.



. 6.5.

www.enes26.ru

μ ν

$$I = (\varphi_{\mu} - \varphi_{\nu}) / (R_{\mu\nu} + Z_{\mu} + Z_{\nu}), \tag{6.36}$$

I - ; $\varphi_{\mu}, \varphi_{\nu}$ -
 μ - ν -

Z_{μ}, Z_{ν} - ; $R_{\mu\nu}$ - ;
 μ - ν -

$$R_{\mu\nu} = 0.$$

“ ” (Z)

$I,$
 , ...

$$Z = \varphi / I. \tag{6.37}$$

$$(AB - E) \varphi = AJ - U_c, \tag{6.38}$$

$$J = \{J_i\}_N, \quad I = 1, \quad J_i = 1 / \Delta L, \quad J_i = 0, \quad Z.$$

$$(BA - E)j = J + J - B(\varphi + \varphi + U_c), \tag{6.39}$$

$$J = \{J_{c.i}\}_N, \quad J_{c.i} = \begin{cases} I / \Delta L_i & i = s; \\ 0 & ; \end{cases}$$

$$\varphi - \mu - I_c, \quad v - I > 0, \quad \mu - I < 0, \tag{6.39}$$

$$(BA - E)j = -J - BU_c, \tag{6.40}$$

(6.30)

φ

μ

$\varphi = \varphi \dots$

1
1...5 .6.6

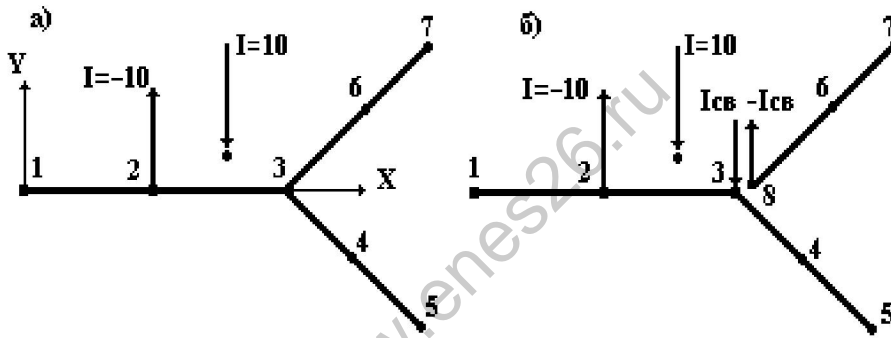
),

6...8 (μ -). 3 8

(v-

-

-



.6.6.

(), I-

()

;

I -

.6.1.

Nn	x,	y,	
1	0	0	, z = 1
2	200	0	, dxt= 200×6
3	400	0	, R =100
4	500	-100	, I = 10
5	600	-200	
6	500	100	- x _a =300, y _a =50, z _a =2 ()
7	600	200	, ρ = 30
8	400	1	, U _c = 0

1.

.(6.38) (6.37):

3 : $Z_{\mu} = 0,234$;

8 : $Z_{\nu} = 0,517$.

2.

 φ

.(6.32):

3: $\varphi_{\mu} = 2,012$;

8: $\varphi_{\nu} = 0$

3.

.(6.36) :

$$I = (2,012 + 0,0) / (0,234 + 0,517) = 2,68$$

4.

- U J J ,

$\varphi = 0$ U =0,

(6.39) (6.29),

.6.2.

6.2

nn	4		5		6	7
	v-	μ -	v-	μ -		
1	-1,163		-0.062		-1.224	-1.201
2	-1.114		-0.044		-1.158	-1.136
3	-1.081		0.180		-0.901	-0.915
4	-0.926		-0.027		-0.953	-0.936
5	-1.095		-0.047		-1.142	-1.124
6	-	-0.858	-	0.036	-0.822	-0.962
7	-	-1.046	-	0.055	-0.991	-1.139
8	-	-1.059	-	-0.092	-1.151	-0.963

2

(6.36),
(U_v, U_μ).

$$U = 0.$$

6...8, 1...5 (v-),
($\mu-$).
1. “ ”

$$(6.42). \quad I \quad U,$$

$$x_a = 300, y_a = 50, z_a = 2 (),$$

v- (6.27), (6.32), (6.34) (6.42).
.6.3 $Z_{uv} c$

($I = 1$)

6.3

-	- ,	φ ,	Z_{uv} ,	Z_v ,
	x, y, z,			
1	450, 0, 0	- 0,009	0,196	0,205
2	400,50,0	0,014	0,219	0,205
3	400,1,0	- 0,048	0,157	0,205

$\varphi = U + \varphi$, $U = Z \cdot I = 1$
 $Z_v = \varphi / I = 0,205$
 (6...8), ... -
 8, -

6.4

-	-	φ ,	$Z_{u\mu}$,	Z_{μ} ,
	, x, y, z,			
1	450, 0, 0	- 0,031	0,462	0,493
2	400,50,0	0,014	0,479	0,493
3	400,1,0	- 0,049	0,443	0,493

“ ” - (U_v)
 . 6.6, (. . μ -
 “ ” U_v
 (U_{μ}) , ... $U = 0$.

6.5

-	U_v , B	Z_u ,	I ,	%%
1	-1.923	0.658	2.922	8.2
2	-2.158	0.698	3.092	13.3
3	-1.547	0.600	2.578	3.9

.6.5
(6.41).

“ ”, $I = 2,68 \cdot \dots$.6.5
I .

.6.5
1 . ,

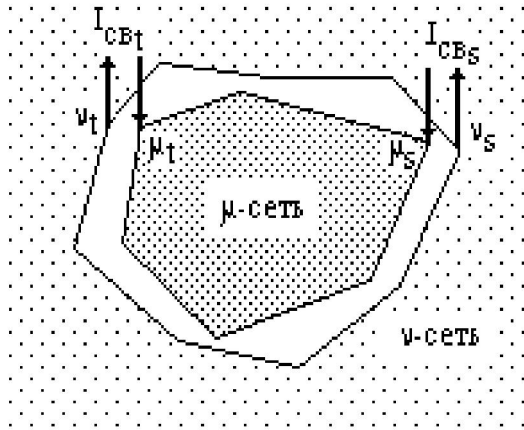
“ U ”,
U

6.3.3.

www.enes26.ru

$\mu-$ $v-$ Q . I_{t} , $t =$
1,2,...,Q, $\mu-$. .6.7, $v-$

$(I_{.s})$, $(I_{.t})$
s.



6.7.

(6.36)

$$I_{c,t} R_{t,t} = (\varphi_{\nu t} - \Delta\varphi_{\nu t}) - (\varphi_{\mu t} + \Delta\varphi_{\mu t}), \quad (6.43)$$

$$\Delta\varphi_{\nu t} = \sum_{s=1}^Q (Z_{\nu t, \nu s} - Z_{\nu t, \mu s}) I_{s,t}; \quad (6.44)$$

$$\Delta\varphi_{\mu t} = \sum_{s=1}^Q (-Z_{\mu t, \nu s} + Z_{\mu t, \mu s}) I_{s,t},$$

Q - “ ”, ... , ; Z_{μt,νs} -
 , ν - I s
 t μ - . Z_{μt,μt} μ -
 t “ ” . Z_{μt,νs}

φ t, μ - , ν -
 s.

(6.44)

$$\begin{aligned} & \mu_{vt} - \mu_{\mu t} < 0, \\ & \dots \end{aligned} \quad (6.43)$$

$$\sum_{s=1}^Q (Z_{vt,vs} - Z_{vt,\mu s} - Z_{\mu t,vs} + Z_{\mu t,\mu s}) I_{.s} + R_{.t} I_{.t} = \varphi_{.vt} - \varphi_{.\mu t} \quad t = 1, 2, \dots, Q, \quad (6.45)$$

$$\check{Z} I = U, \quad (6.46)$$

$$\begin{aligned} \check{Z} &= \{\check{Z}_{ts}\}_Q \times c, & \check{Z}_{ts} &= Z_{vt,vs} - Z_{vt,\mu s} - Z_{\mu t,vs} + Z_{\mu t,\mu s} + \delta_t R_{.t}, \\ U &= \{U_{.t}\}_Q, & U_{.t} &= \varphi_{.vt} - \varphi_{.\mu t}. \end{aligned}$$

www.eler26.ru

$$\check{Z}_{ts} = \begin{cases} Z_{vt,vs} - Z_{vt,\mu s} - Z_{\mu t,vs} + Z_{\mu t,\mu s} + R_{.t} & t = s \\ R_{.t} & t \neq s \end{cases} \quad (6.42).$$

$$U_{.t} = (U_{vt} - U_{\mu t}). \quad (6.39),$$

$$\varphi = 0, \quad Z_{vt,\mu s} - Z_{\mu t,vs}.$$

($v = 1, 2, \dots, M$, $M -$ $Z_{vt,vs}$ $).$

4.

$$Z_{vt,vs} \quad Z_{\mu t,\mu s}, \quad ,$$

(6.46).

$\{ \check{Z}_{pq} \}$, $p, q = 1, 2, \dots, Q$, $Q -$ $\check{Z} =$

$$v_t \rightarrow p \quad \mu_s \rightarrow q.$$

(6.46),

I .

5.

I ,

(6.39)

,

(6.32)

j.

U.

3

$Z_{\mu t,vs}$,

4

\check{Z}_{pq} .

φ ,

$Z_{vt,\mu s}$

1

150...300 .

6.4.

() ,
 , , ,
 .
 , .
 , .
 , .
 1. .

$$F = I_1 + I_2 + \dots + I_M, \tag{6.47}$$

I_i -
 ($i = 1, 2, \dots, M$).

2.

() U_{\min}

$$Z_{i1} I_1 + \dots + Z_{ik} I_k + \dots + Z_{iM} I_M \geq U_i - U_{\min}, \tag{6.48}$$

$$i = 1, 2, \dots, N, \quad k = 1, 2, \dots, M,$$

U_i -
 ; Z_{ik} -
 , “ ” i -
 k - .

.(6.44), “ ”.

$$\Delta U_i = Z_{ik} I_k$$

i - , k -

$I_k > 0$.

3.

() .

$$R = R_1 + R_2 \quad (6.51)$$

$$\begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot^2 \end{pmatrix} R = \dots = \pi d R_s, \quad (6.52)$$

d - , ; s -

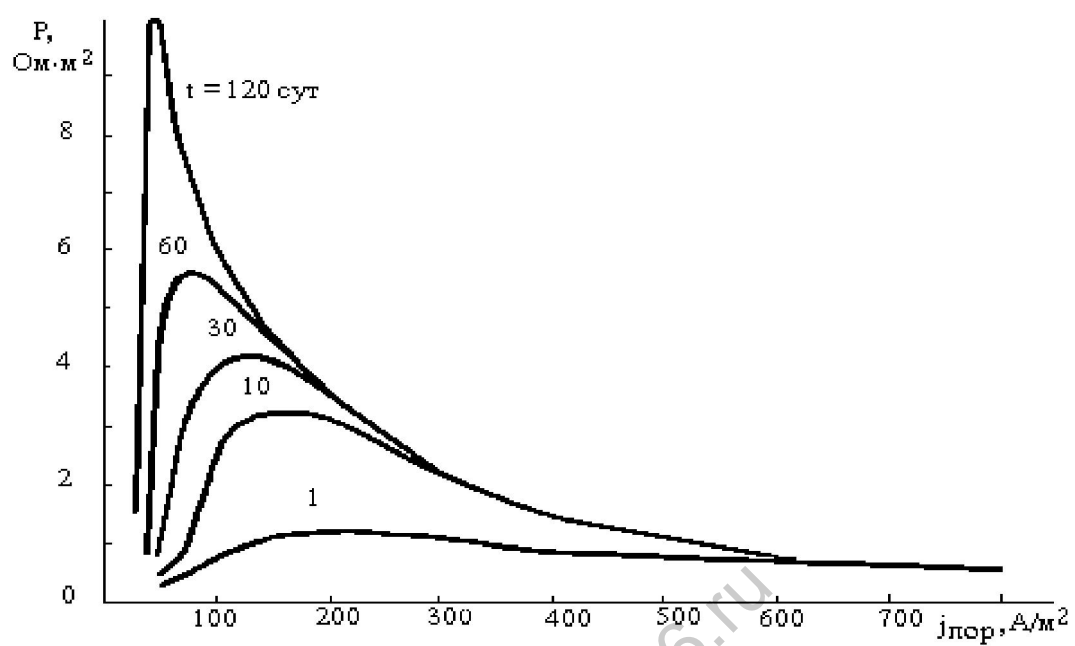
(t), (j, t), j = (j, t).

$$j = j / (\pi d s), \quad (6.53)$$

j - , /²; j - , / .

(j, t) .6.8 =

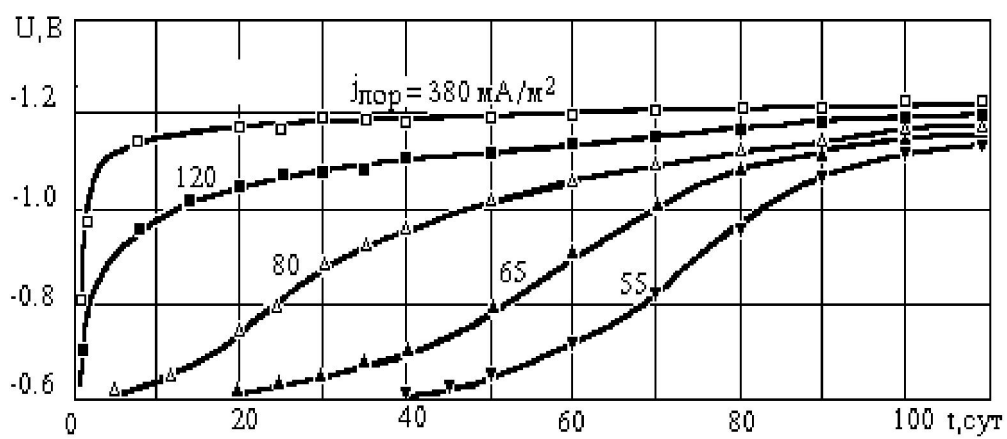
(j = const) .6.9



.6.8.

(j)

(t).



.6.9.

$$R = \rho h / (\pi ds), \quad (6.54)$$

h - , ; ρ -

$$h = 0,01, \quad (6.51)$$

$$R = (\quad + 0,01\rho) / (\pi ds), \quad (6.55)$$

(6.24),

$$R \quad (6.25)$$

6.5.2.

U

1.

$$R = \text{const}$$

$$R = 25...150$$

2.

$$s = / (\pi dR), \quad (6.56)$$

-
- $= 0,6...1,5 \cdot 2^j$, $\cdot 2^j$.
3. $R \cdot$ (6.27) j
4. (6.53) -
- j
- $= (j, t)$
5. (6.55) -
- R .
6. .2, ,
- j.
- 5.

7.

7.1.

1981 . , - , -
 , . - . -
 « » « », . -
 1986 . « », -
 , , - , [42]. -
 (2002), - 6(1998) - 7 .
 5(1994). - 7 - -
 - 7 :

www.enes26.ru

- 1) - -7 - ;
- 2) - -7 - ;
- 3) - -7 - .

7.1.1. -7

- =1.
- =2.
- =3.

=1

6.

-
-
-
-
-
-

(

www.enes26.ru

U_{.min} ; U_{.max} ;

(

;

;

=2

,
-
-
-

:

;

;
;

- p -

- ;

- ;

- ;

- ;

- , ,

- , -

-

- ,

- , ,

- p “

- ” , ,

- , ,

- , ..

- ..

-

- =3

-

-

- :

- ;

- ;

- ;

- ;

- ;

- . R

-

- .

-

-

- 6 :

- ;

-

-

www.enes26.ru

7.1.3.

-7

- :
- ;
- ;
- ;
- ;
- .

7.1.4.

MsAccess 2000 -

MsOffice 2000.

- EZ .mde.

- EZRW.exe – ; :
- GD.exe – ;
- GP.exe – ;
- GS.exe – .

EGD.exe

p , p p p p

...

, EZ :

www.enes26.ru

- (

-);

-

- ;

- 1, 2, -

- ;

- .txt - ;

- .txt - ;

- .txt - -

- ;

- .txt - -

- ;

- RR30, RR33, RR43, RR47 - ;

- OUT - .

-

-

-

-

- « ».

- -7 (6)

-

- -153-39.4-091-01 «

- »,

-

-

7.2.

7.2.1.

.7.1

R

$$R = \rho / (\pi t(d - t)), \tag{7.1}$$

$\rho = 0,18$ - , \cdot $^2/$; d - , ; t - , .

7.2.2.

$=3$ (. 7.1.1), R R -
 .7.2.

(R') :

$$R' = R / (\pi d), \quad (7.2)$$

7.1

\times $d \times t,$	R , /
57×3,5	$3,06 \cdot 10^{-4}$
89×3,5	$1,92 \cdot 10^{-4}$
108×4	$1,38 \cdot 10^{-4}$
133×4,5	$9,91 \cdot 10^{-5}$
159×5	$7,44 \cdot 10^{-5}$
219×6	$4,48 \cdot 10^{-5}$
273×6	$3,57 \cdot 10^{-5}$
325×7	$2,57 \cdot 10^{-5}$
377×8	$1,94 \cdot 10^{-5}$
426×8	$1,71 \cdot 10^{-5}$
529×9	$1,22 \cdot 10^{-5}$
620×9	$1,04 \cdot 10^{-5}$
720×10	$8,07 \cdot 10^{-6}$
820×10	$7,08 \cdot 10^{-6}$
920×11	$5,73 \cdot 10^{-6}$
1020×12	$4,74 \cdot 10^{-6}$
1220×12	$3,95 \cdot 10^{-6}$
1420×12	$3,39 \cdot 10^{-6}$

6. () -

.7.2. R -

7. ()

8. -

. R

7.2.3.

(6.7)). φ , ρ (ρ) -
 $U = \varphi - \varphi$ ρ (ρ)
 U ρ ,

.7.3,

$d = 200 \times 6$

, ρ . () -

, ρ . .7.3,) -

, $U \leq U_{\min} = -0,85$, -

, 10 , ρ , -

3.

ρ , ρ . -

, ρ , -

. , -

4.

: , -

, -

, .

5.

. , ρ -

. , -

() , -

.

7.2.4.

www.enes26.ru

, -

, U ,

.

-

U -

.

- ,

.

, " , "

. -

, - ,

6 , φ .

() - .

() -

() , -

7.4.

() ,

$U = -0,55$,

:

- $U = -0,55 + (0,30 - 0) = -0,25$;
- $U = -0,55 + (0,30 - 0,20) = -0,45$;
- $U = -0,55 + (0,30 - 0,25) = -0,50$.

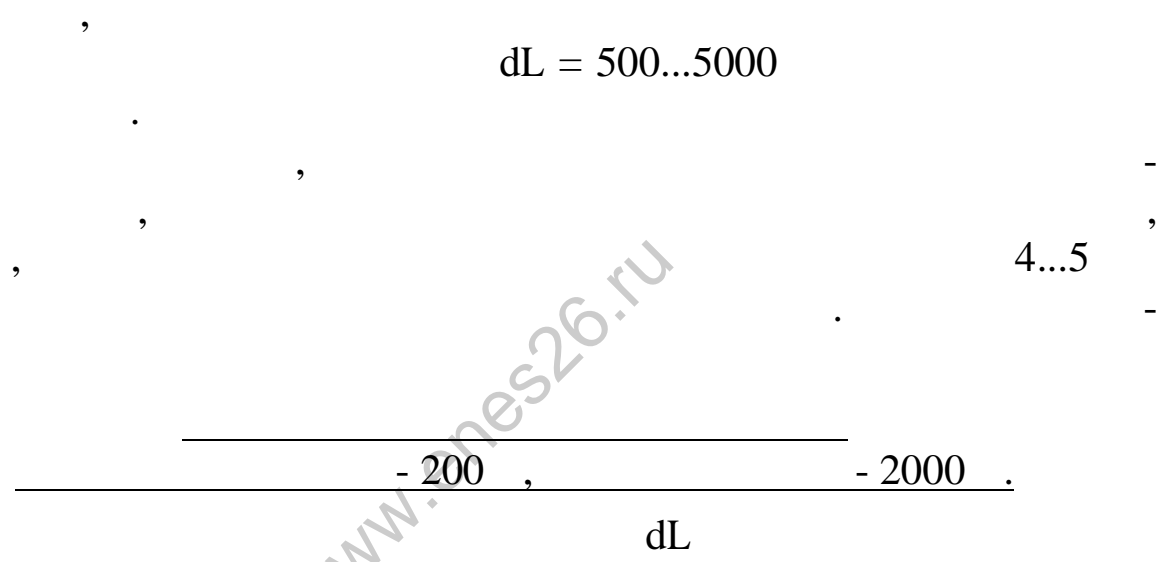
7.4

	-	-
		0
		+0,20
		+0,25
		+0,30

$$\begin{aligned} dL = 50 & \quad dU\% = 0,05\% ; \\ dL = 500 & \quad dU\% = 5\% . \end{aligned}$$

$$8,07 \cdot 10^{-6} \quad / \quad R = 400 \quad \cdot \quad R =$$

$$\begin{aligned} dL = 500 & \quad dU\% = 0,04\% ; \\ dL = 5000 & \quad dU\% = 4,2\% . \end{aligned}$$



$$.7.6 \quad (dU\%) \quad dL = 25, 50, 100$$

$$: d = 108 \quad , \quad t = 4 \quad , \quad R = 30 \quad ; \quad 0$$

;

$$y = 0, \quad z = 1$$

var.

$x_a =$

7.6

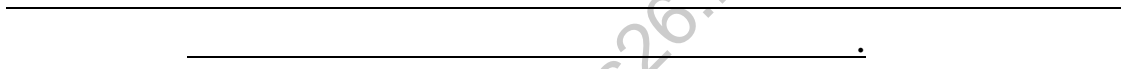
	= -100			= -50			= -25		
	25	50	100	25	50	100	25	50	100
0	1,0	3,5	9,6	1,6	4,7	11,7	2,8	6,7	15,7
50	0,2	1,3	7,2	1,3	2,6	6,9	1,9	5,2	13,0
100	-	0,7	5,4	1,1	2,2	6,5	1,5	3,8	12,4

.7.6

dU% = 5...10%,

dL

50 .



R = 150

5

.7.6,

- dL = 50 ... 200 ;
- dL = 200 ... 2000 .

7.3.2.

0 0 , Oz -

.

,

,

.

.

.

1. -

,

-7 200 .

2. :

) ;

) ;

) ;

) ;

) ;

) ;

) ;

3. :

) -

) - (50) ;

) , () ;

) ;

,

4. :

,

2 .

5. , () ,

,

(.) .

6. -

.

www.enes26.ru

7.3.3.

б (μ-), (v-).
 EZ

б,
 (I),
 ;
 (φ_c),
 “ ” (6.41)

$$I = (U_{\mu} - U_{\nu}) / (Z_{u\mu} + Z_{u\nu}), \quad (7.5)$$

$$Z_{u\mu} = 0,05 \dots 0,2 \cdot Z_{u\mu}$$

(6.39). J_c

I , , «+»

φ .

(7.5).

I_c

(6.39).

6,

φ

1.

Z_{υμ}

$$L = 100 / Z_{υμ}, \tag{7.6}$$

Z_{υμ}

(

$$d = 1500 ;$$

$$t = 30 ;$$

$$R = 350 \cdot 2.$$

2.

(6.27)

I ,

3.

(6.30) (

EZ ,

«

φ . ,

4.

φ . (

(6.39) φ

φ . , . .

φ = φ .)

, . . .

$$U_c \rightarrow U + \varphi, \quad J, \quad (6.39)$$

1.

2.

3.

www.enes26.ru

(I)

(7.5)

(φ).

()

(6.39).

φ

φ

www.enes26.ru

I ,

2. , -
 . 10...20% -
 . -
 .

3. .
 4. , , .

1. 4...6 -

2. . -
 0,03 , . I = -
 .

3. -
 -

1. -

2. . -
 . 500 -

3. -
 .

7.4.2.

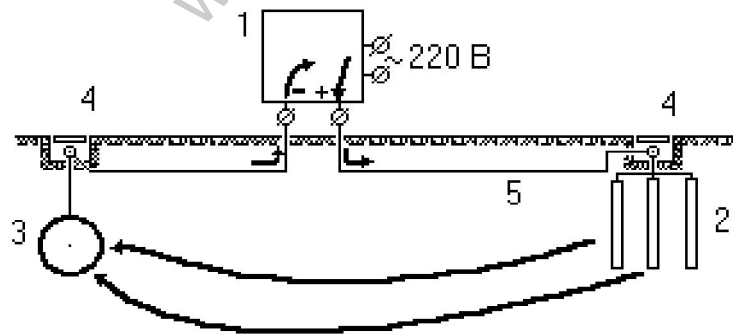
=2 , -
 , , .

8.

8.1.

.8.1

().



.8.1.

.1 -

; 2-
; 4-

; 3-
; 5-
-

1

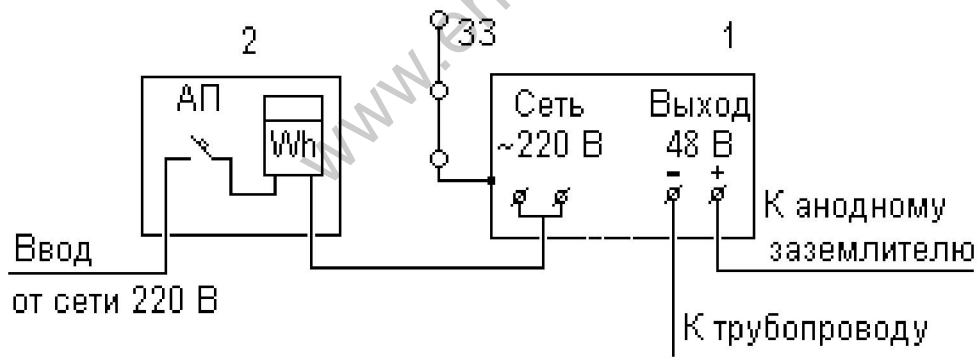
2,

“+”

3, “_” , 4 - -
 5 . - -
 :

1000 ;

(.8.2).

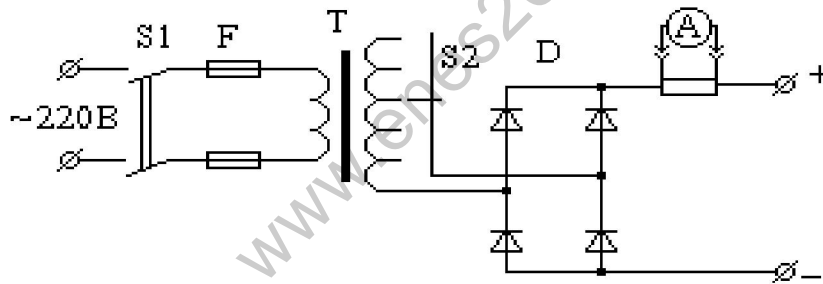


.8.2. ; 2 - ; Wh - ; 1- ; -

8.2.

(8.1, .1)

8.3



8.3.

S1 -
T -

; F -

; S2 -

; D -

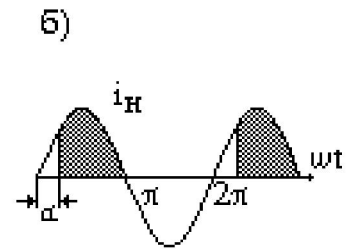
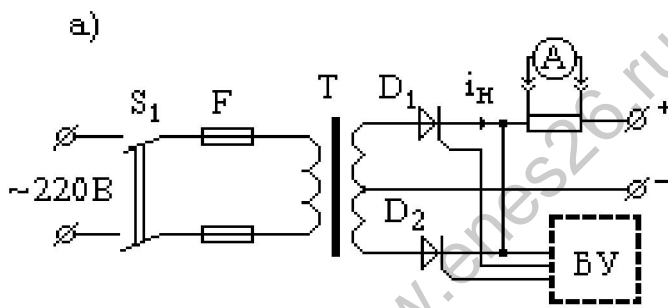
220

24 96

S2

D,

.8.4.



.8.4.
á

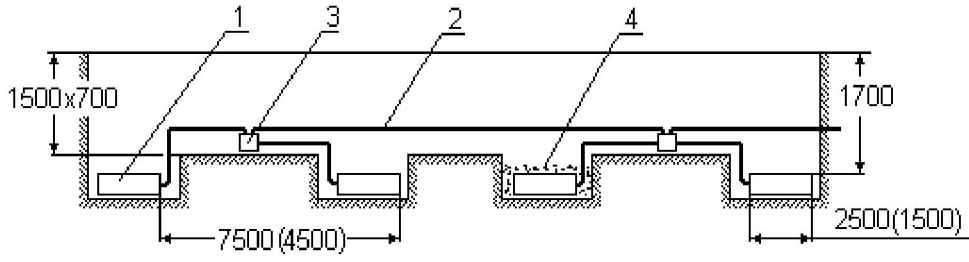
() -
().

($U = 0,4...0,7$),

()

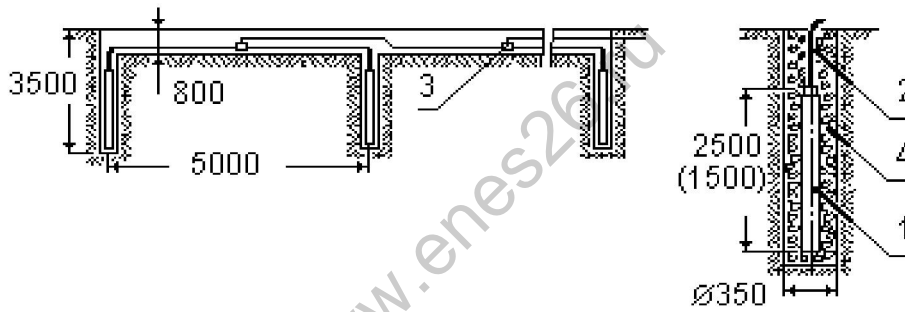
.8.4,

$\alpha = 0$



.8.5.

-2500 (1500): 1- ; 2-
 1 25; 3 - ;
 4- 3000 400.

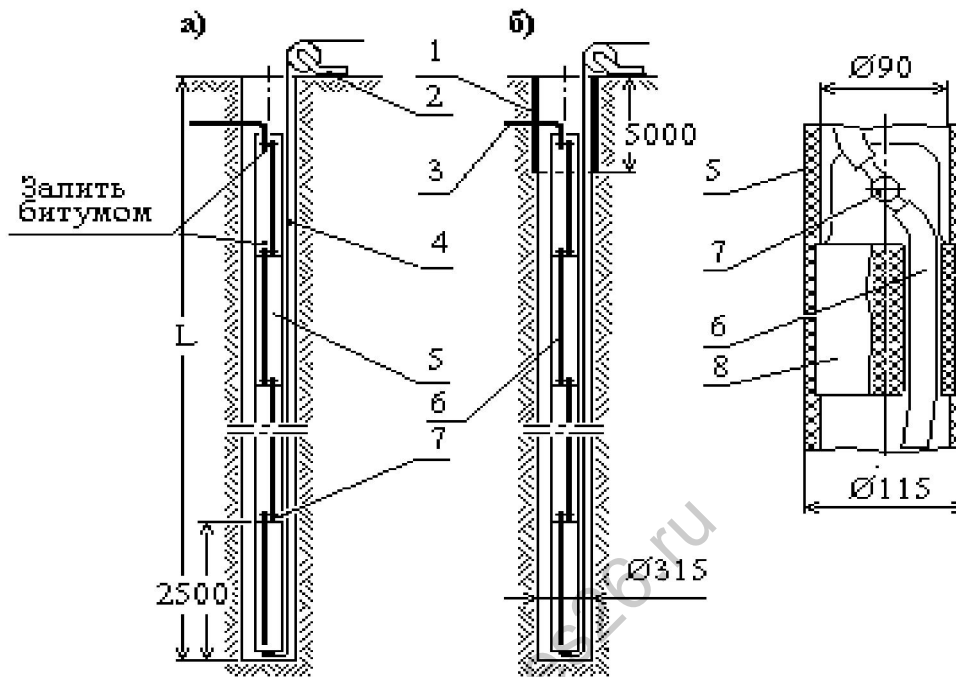


.8.6.

-2500(1500).

.8.5.

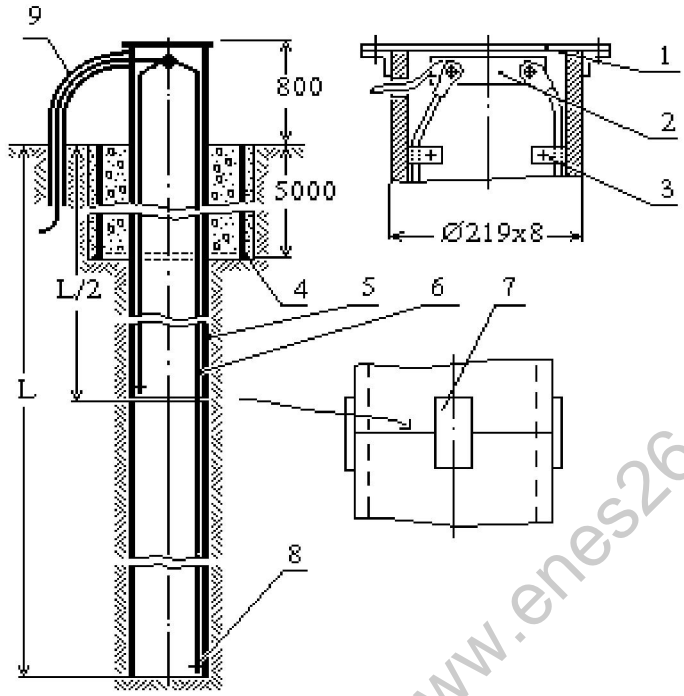
-
 , , -
 , 7 , -
 , .8.6,
 ,
 .8.7.
 100 -
 , -



8.7.
 -2500. 1- ; 2-
 ; 3- " + " ; 4- -4;
 5- -2500; 6-
 1 25; 7- ; 8- -

5
 8 , 4 2.
 7 . 8 6,
 L

(50),
1 .8.7, .



.8.8.

- 1- ;
- 2- ; 3- ; 4- ;
- 5- ;
- 6- ;
- 7- ;
- 8- ; 9- ;

.8.8.

5,

7.

6. 8, 2
8

), , , (

8.4.

(. . . 2.8) 1 1 , - -
 . . . , 750 10
 150000 20
 15000 -
 ,
 .8.1

 8.4.1. C

 -
 -

www.enes26.ru

8.1

	- , q, /(. . .)
+	10 4...5 0,8...1,5 0,1...0.3 0,04...0,08 0.002 ~ 0

1...2

3

8

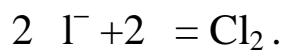
$$0,6 / ^3.$$

10

$$(. . .8.1).$$

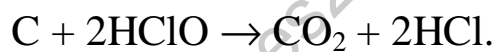
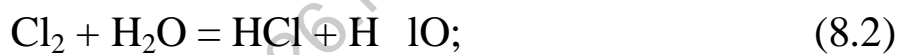
www.enes26.ru

.8.9,



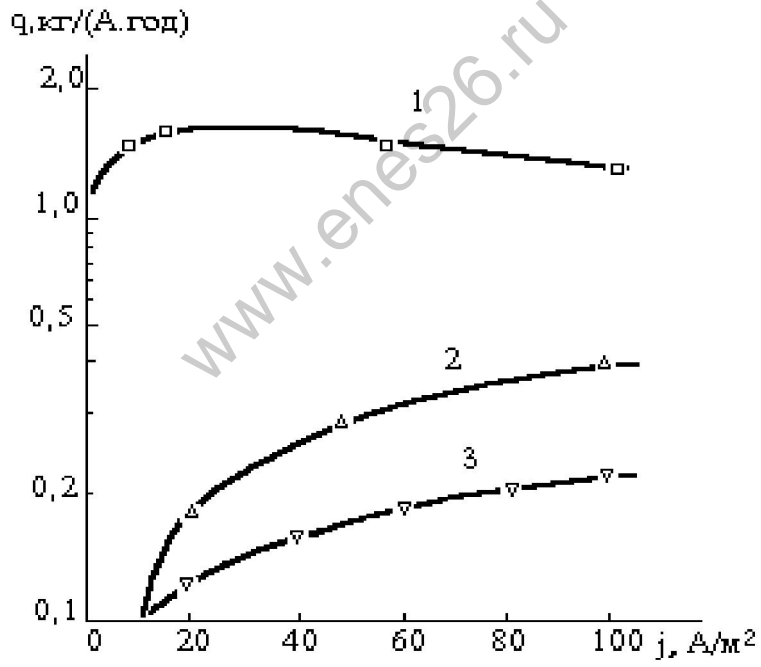
C

Cl



1


 $q = 1,2 \text{ / (} \cdot \text{)},$
 $q = 0,2 \text{ / (} \cdot \text{)}.$



.8.9.

. 1 -

; 2-

; 3-

90 , 1,5 3 . 3- 115 , -
 22 . -
 (82%), -
 . , 140 -
 5.905-6 8.402-5 “ . .8.7, -
 ”). -

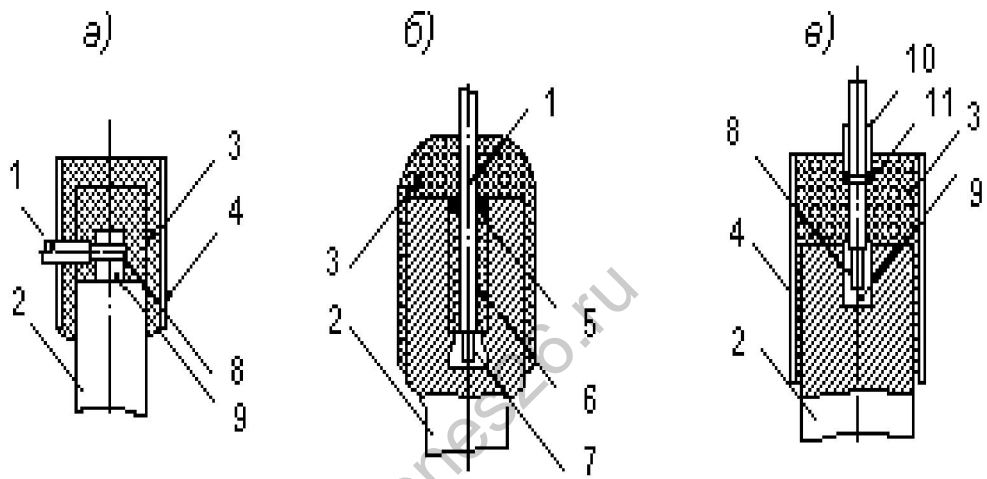
(8...13)·10⁻⁵ , , 3 5 .
 4,5 / ²,
 20 / ² .
 - . , , -
 ” “ -

www.enes26.ru

8.4.3.

()
 14... 17 14...17% (Si) -
 7000...7200 / ³. -
 , SiO₂, -
 SiO₂ . -
 (4%) . -
 , .8.9 , -

- 10...50 / 2 .



.8.10.

; 2-
; 4-
; 6-
; 9-
; 11-

; 2-
; 4-
; 7-

.1-
; 3-
; 5-
; 8 -
; 10- -

-2

24

, 4

65

60

1500

.8.10

-2

$$\begin{array}{r} -1, \\ , \\ , \end{array} \begin{array}{r} -2 \\ -1420 \\ -40 \end{array} \cdot \begin{array}{r} -2 \\ -53 \\ -40 \end{array} \begin{array}{r} -2 \\ -3 \\ -3 \end{array} : \begin{array}{r} - \\ -3, \\ -185 \\ -12 \end{array}$$

8.4.4.

· , (2.7) , -

$$= 207,2 \quad q = 9,12 \quad /(\cdot \quad),$$

$$q = 3600 \cdot 207,2 / (2 \cdot 96500) = 3,8673 \quad /(\cdot \quad)$$

$$q = 3,8673 \cdot 365 \cdot 240,001 = 33,8 \quad /(\cdot \quad).$$

“ ”: , -

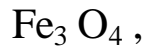
0,05 /(\cdot \quad) 1% 6% , -

$$350 \quad / \quad ^2.$$

PbO₂,

Pb+Ag -

8.4.5.



$\rho = (5...10) \cdot 10^{-5}$

1...2 / (A), ... 1000

- 90...200 / ².

10000

8.4.6.

(2,5...10

),

4...10 / (·) . 2000 / ² ,

10...14

50...100

8.5.

8.5.1.

6.

www.enes26.ru

$$U(L) = U(0)e^{-\alpha L}, \tag{8.4}$$

L -

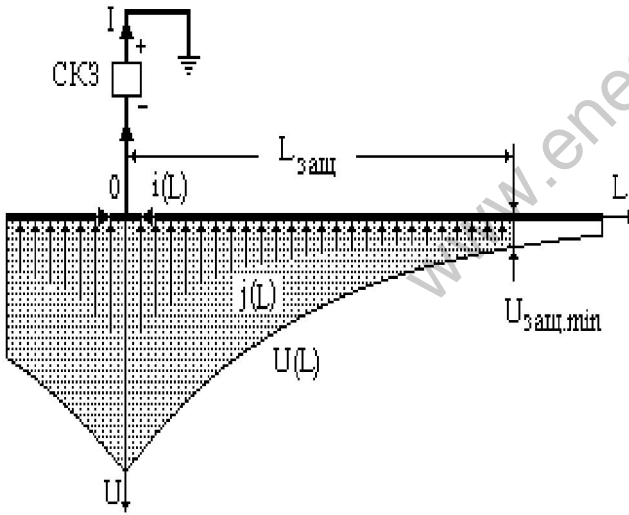
; U(L) -

; U(0) -

; α -

.8.11

$e^{-\alpha L}$.



8.11.

U(L)

j(L)

; L

; U_{зам, min} -

(8.4)

$$\alpha = \sqrt{R' / R} ; \tag{8.5}$$

$$U(0) = \alpha I R ; \tag{8.6}$$

$$R = R' + b\rho, \tag{8.7}$$

R - / ; R -
 () ; R -
 ; I - ; b -
 (b = 1,4...2,0 d = 100...1000).

$$\varphi = 0. \quad (8.4)$$

6 -7 , 7.

8.5.2.

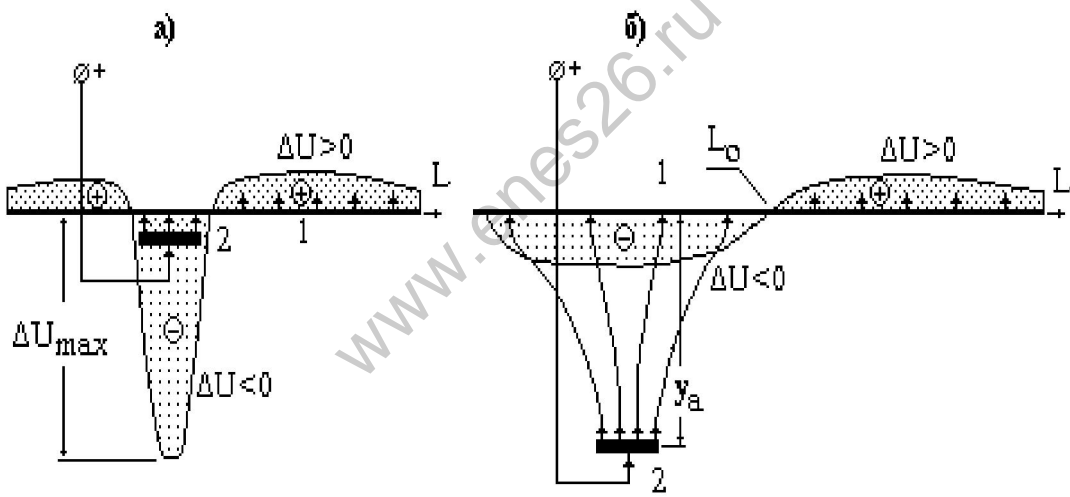
www.enes26.ru

“ ”
 “ ”
 ()
)

(.8.12).

.8.12,

$\Delta U(L)$,



.8.12.

()

()

(1)

(2).

ΔU

L :

$\Delta U < 0,$
 (j) $\Delta U =$
 R j;
 $\dots j > 0 \quad \Delta U > 0;$
 $\Delta U(L), \quad j(L),$
 (" + " " - " .8.12).

.8.12

" " L_0 ;
 ΔU_{\max}
 ΔU_{\max} y_a
 $\Delta U = \Delta U_{\max} \rightarrow 0.$
 .8.13 ΔU_{\max}

$I = 10$, $\rho = 40$, $d = 200$ 6 , $R = 50$
 > 200 y_a

-7 .

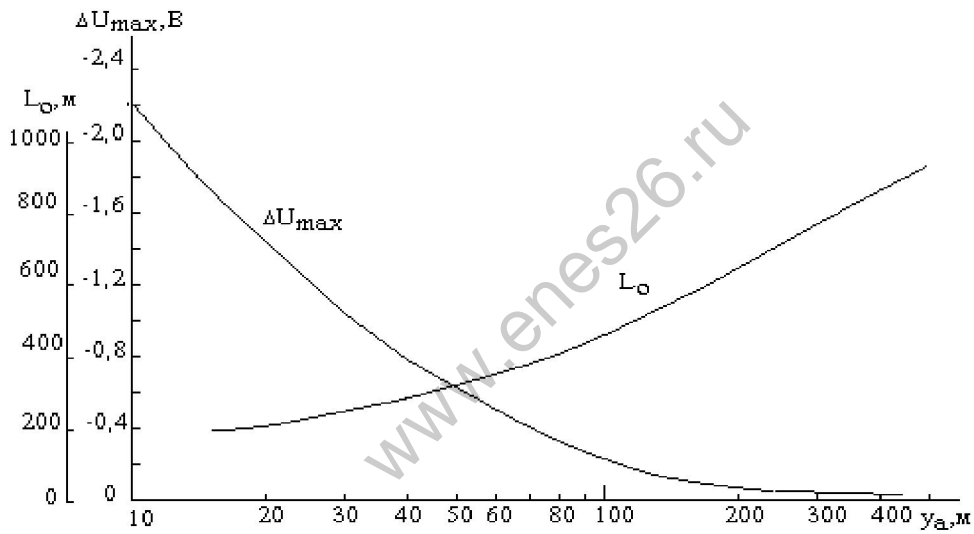
$$y_a = 150 \dots 250$$

.8.13

(L_o)

$$L_o = 200 \dots 300 \text{ ,}$$

$$L_o = 600 \dots 800 \text{ .}$$



.8.13.

ΔU_{max}

L_o .

8.5.3.

)“+”

, “-”

;

)”-”

, “+”

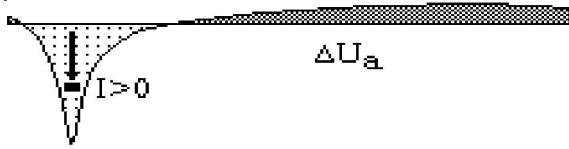
$$\Delta U = \Delta U + \Delta U_a, \quad (8.8)$$

ΔU , ΔU -

,

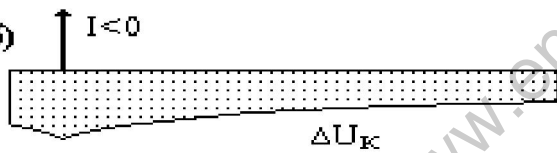
; ΔU -

a)

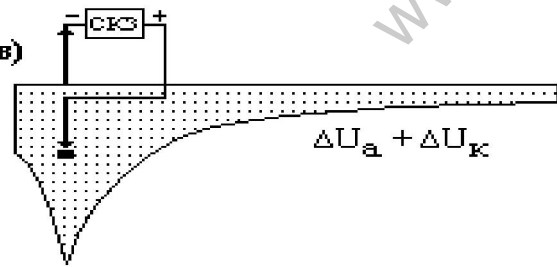


.8.14.

б)



в)



ΔU .8.14,
 .8.13, ΔU ()
 ()

-

;

-, , -
 . , -
 . , -
 . , -

300 ,

>200

.8.15 ,

R = 50

$y_a = 10$
 L = 65

R = 500

.8.15 ,

y_a

10

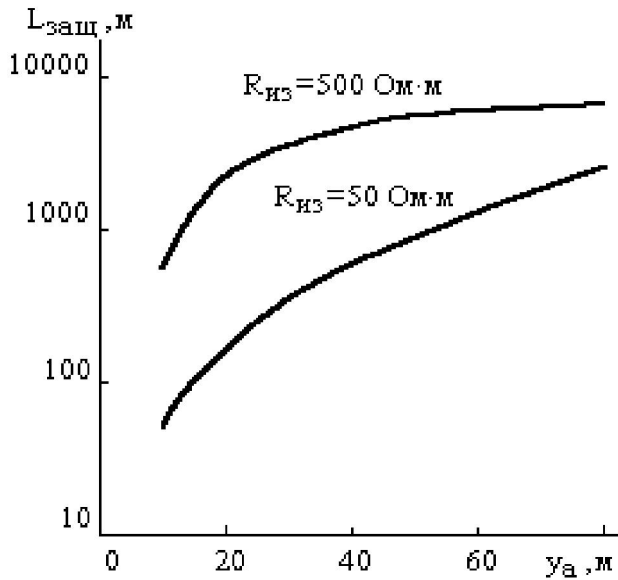
y_a

$\rho = 40$

, d = 200x6

, . . U = U_{.max} = -2,5 ,

U = U_{.min} = -0,85 .



.8.15.

y_a

R .

$$R = 50$$

.8.15,

>60 .

(

)

:

$$\begin{matrix} - & = 30...100 & L & = 150...1500 & ; \\ - & = 150...250 & L & = 4000...20000 & . \end{matrix}$$

$$=30...50 .$$

$$R = 500$$

$$= 100$$

L

L

$\rho,$

$\rho \rightarrow 0,$

$(\varphi \rightarrow 0)$,

ΔU_a

(8.8).

$\rho < 10$

= 10 .

8.5.4.

), () .

(

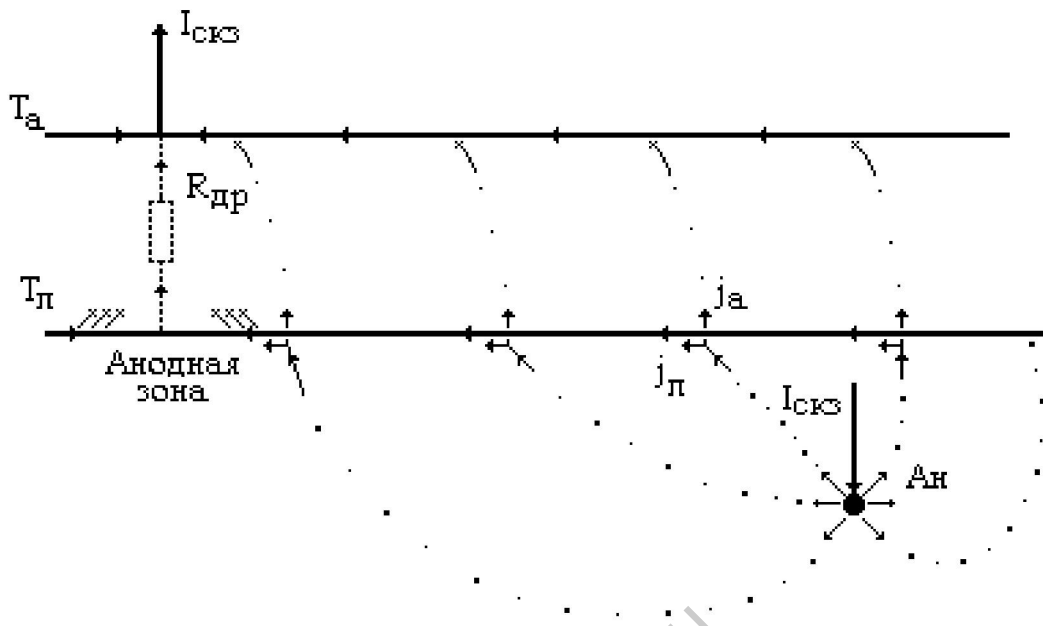
.8.16.

j ,

j

j ,

() .



.8.16.

www.enes26.ru

R (.8.16).

$$\varphi = \varphi(r) + U \quad (8.12)$$

$$(\epsilon = 0,05 \dots 0,5 \cdot r^2).$$

r -

$$(8.11) \quad (8.10) -$$

$$R = \varphi(r) / I = \rho / (2\pi r) \quad (8.13)$$

:

$$R = \rho / (2\pi L) \ln \left(\frac{2L}{d} \sqrt{\frac{4h + 3L}{4h + L}} \right); \quad (8.14)$$

$$R = \rho / (2\pi L) \ln(L^2 / (hd)), \quad (8.15)$$

L -

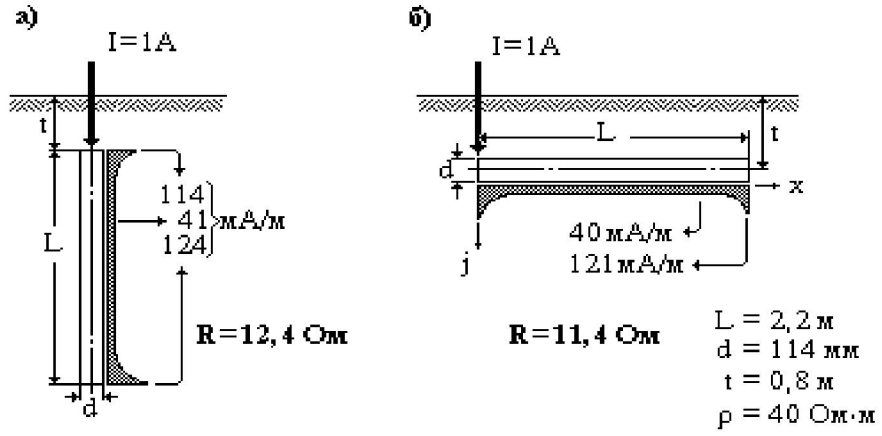
$$; h -$$

$$d \ll L, h \ll L.$$

; d -

.8.17

$$R \quad (8.14) \quad (8.15).$$



.8.17.

“ ”.

, , , —

“ ”, , —

, , . —

www.enes26.ru

- -7 .

6

(R)

8.6.2.

“ ”

, , , R - -
 , n , R - -

, , ...

$$R = FR / n, \tag{8.16}$$

F - ; R - ; R - ; n - [] .

$$F = 1 + \rho \ln(0,66 n) / (\pi s R), \tag{8.17}$$

s - F 1,1...1,8.

8.6.3.

() (n) , ...

$$= + = \min ; = kn + 2; \tag{8.18}$$

$$C = I^2(FR / n) (t / \eta) + 2,$$

k - , / ; 2 - , ./ ; - , ./ ; - , =

0,11...0,15; I - , ; t -

, t = 8750 ; η - , η = 0,5...0,6.

$dC / dn = 0,$

n

$$n = I \sqrt{8,76 F R / (k \eta)}. \tag{8.19}$$

(n) , ... (8.19)

(8.19)

$$n = 0,21 I \sqrt{\rho} , \tag{8.20}$$

0,21

8.6.4.

www.enes26.ru

$$G = qIT \tag{8.1}$$

(G) (T) (I).

(n)

$$n = qIT / (G \eta) , \tag{8.21}$$

G - q - , / ; $\eta = 0,4...0,6$ - (. .8.1);

-2

$$G = 12 \quad I = 10$$

$$= 15 \quad q = 0,2$$

$$I(\dots) \dots \eta = 0,5. \quad (8.21)$$

$$n = 0,2 \cdot 10 \cdot 15 / (12 \cdot 0,5) = 5 \dots$$

$$(n = 5)$$

$$(n = 6).$$

$$R = 3,6$$

$$\rho = 10$$

$$F = 1,4,$$

$$U = I \cdot R = I \cdot F \cdot R / n = 10 \cdot 1,4 \cdot 3,6 / 5 = 10 \dots$$

$$U = 48 \dots$$

$$\dots \rho = 40 \dots$$

$$R$$

$$4$$

$$U = 40 \dots$$

$$100$$

$$(n = 1).$$

$$n = 5, \dots U = 50 \quad (\rho = 10 \dots)$$

$$U = 200$$

$$(\rho = 40 \dots),$$

$$U = 48 \dots$$

?

2,5²

30

90 ,

$$I = 50 \dots 100$$

95...120²,

40

$$U = 1 \dots 2$$

$$L = 100$$

$$I = 50$$

$$S = 16 \cdot 3 = 48$$

$$\rho_{Al} = 0,03$$

$$R = 0,03 \cdot L / S = 0,03 \cdot 100 / 48 = 0,06$$

$$U = IR = 50 \cdot 0,06 \cong 3$$

$$U = 48$$

(8.22),

$$U =$$

44 ($U \cong 1 \quad \Delta U = 0$).

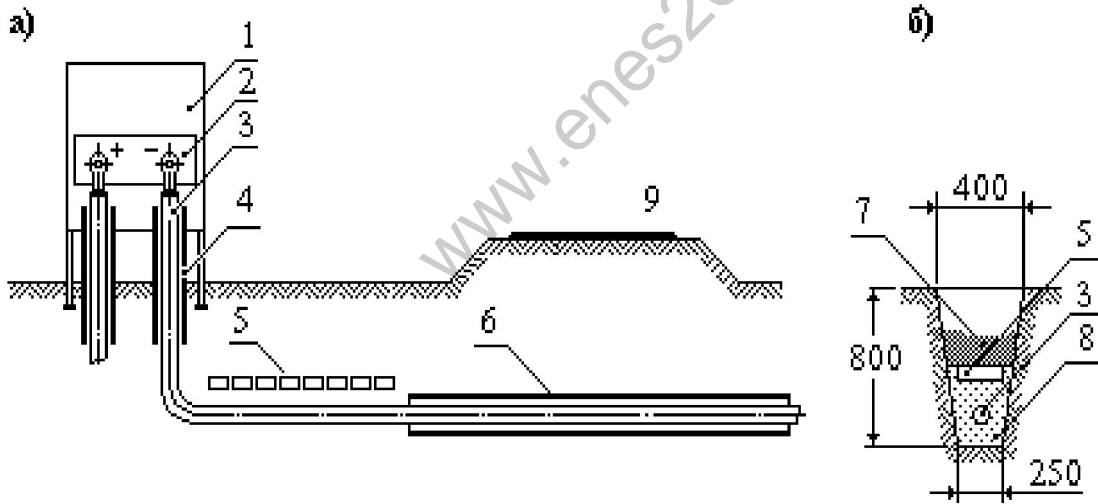
30% 15 ,

29 .

.8.2,

8.2

	2
0...12	4
12...18	6
18...25	10
25...35	16
35...50	25
50...100	35



.8.18.

- 1- ; 2- ; 3- ; 4- ; 5- ; 6- ; 7- ; 8- ; 9-

(-
-
.
-
-
.-
-

8.7.3.

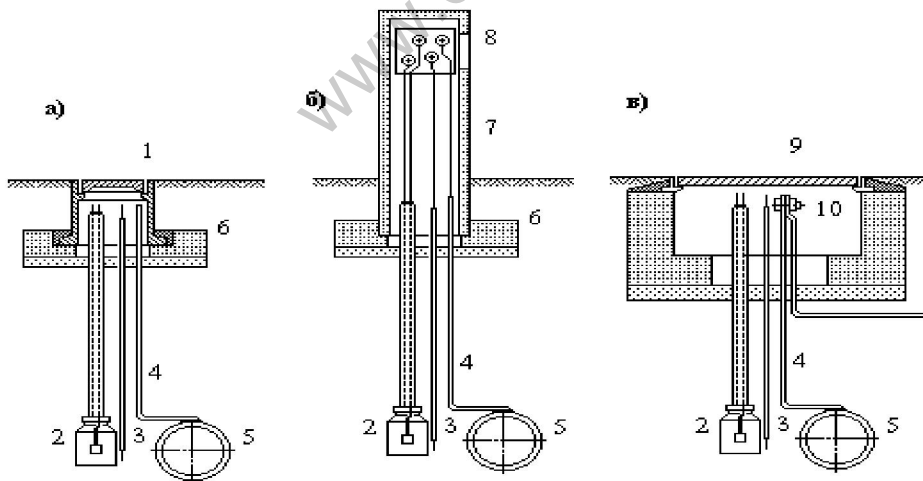
.8.21

() ,

()

200 -

500 -



.8.21.

()

(): 1 - ; 2 - () ,

; 3 -

; 4 - ,

; 6 -

; 8 - ; 9 -

; 5 -
; 7 -
; 10 -

-
-
-
-
-

.8.3.

8.3

	-10	-50
,	10	50
,	30	100
,	0,3	0,24
,	0,01	0,05
,	180 140 95	305 320 150
,	2	6,2

7.402-5 “

-10

-50,

.8.3.

9.

9.1.

200

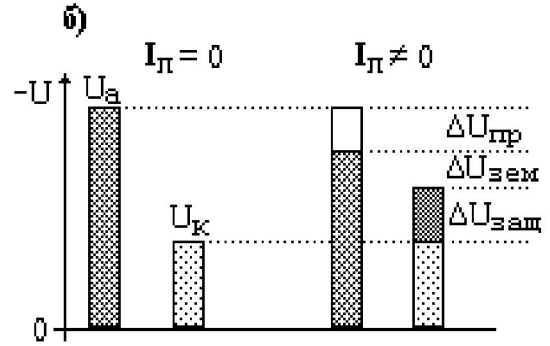
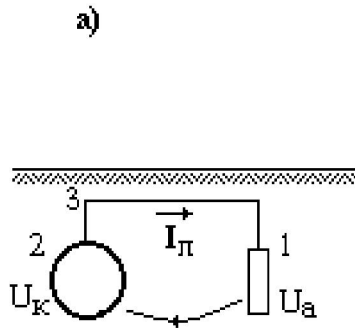
www.enes26.ru

(9.1,).

(2.2).

(q)

(2.7). (G)



9.1.

(): 1 - ; 2 - ; 3 - ()
 , I - ; U_a, U -

www.enes26.ru

$$Q = 8750 / q ;$$

(9.1)

$$Q = Q \eta ,$$

Q, Q -

, / ; η -

; q -

, / (.).

,
 ,
 (T),
)

$Q < Q,$
 (2.7),
 (T,)
 (I,)

$\eta.$
 (G,

$$T = QG\eta / I. \tag{9.2}$$

. . . . $= U - U_a$

.9.1, , $\Delta U -$
 ; $\Delta U -$
 $\Delta U < 0$ $\Delta U > 0.$

www.enes26.ru

$$U = U - \Delta U ; \tag{9.3}$$

$$U = U + \Delta U ,$$

$U , U -$

$$(U < U_{min}),$$

,
 “
 ”.

9.2.

: , .

.9.1

() .

9.1

		-		-	
,	-2,36	-1,66	-0,76	-1,18	-0,44

.9.1,

.9.29.4

9.2

	%			%				
	Al	Zn	Mn	Fe	Cu	Ni	Si	Ti
16	7,5...9	2...3	0,15...0,5	0,03	0,15	0,01	0,2	-
M 4	5...7	2...3	0,15...0,5	0,003	0,004	0,001	0,05	-
1	5...7	2...4	0,02...0,5	0,003	0,004	0,001	0,04	0,04

9.3

	%				%		
	Zn	Mg	Sn	Zr	Fe	Cu	Si
2	0,4...0,8	-	-	-	0,1	0,01	0,1
3	4...6	-	-	0,001...0,1	0,1	0,01	0,1
4	4...6	0,5...1,0	0,05...0,1	-	0,1	0,01	0,1

9.4

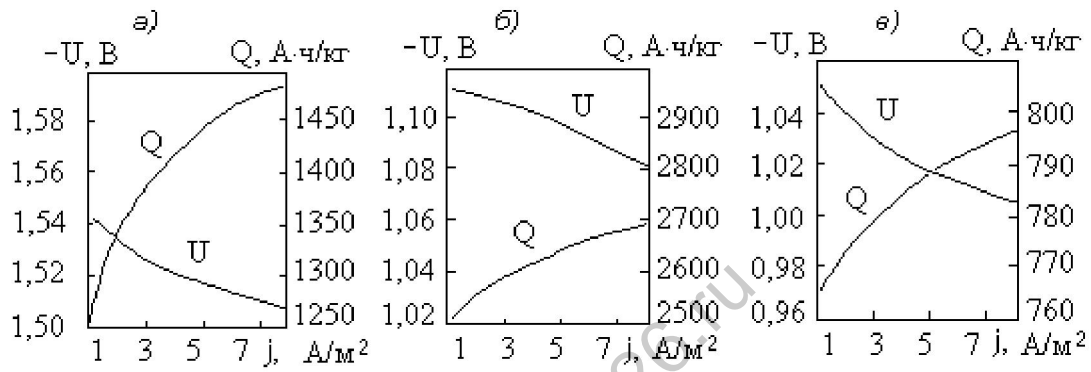
	%					%		
	Al	Mg	Mn	Ti	Si	Fe	Cu	Pb
1	0,4...0,8	-	-	-	-	0,001	0,001	0,005
2	0,5...0,7	0,1...0,3	0,1...0,3	-	-	0,004	0,001	0,005
3	0,2...0,6	-	-	0,005... .0,1	0,005... .0,1	0,004	0,001	0,005

(η) 10...20%

(99,995%)

55%.

Fe+Si+Cu 0,2% 0,5% η 85%



.9.2.

(Q) 1 (), 4 () (U) () 1, 2, 3 ()

(U = U)

(Q).

.9.2

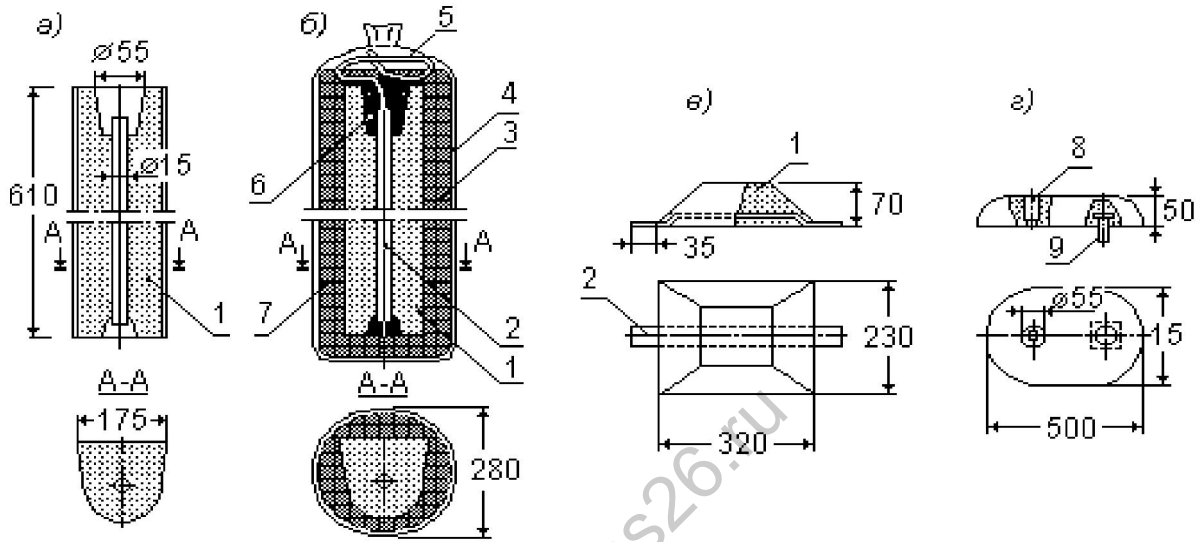
9.5

	U , ()	Q , /	η , %	q , /()
	-1,5	1400	60	7,2
	-1,1	2600	85	3,9
	-1,1	790	95	12,6

(

.9.3) -

-2 / , - 2 , 30 , -30 .



.9.3. : -
 20; - -20 ; -
 - 10; - - 9. 1-
 ; 2 - ; 3 -
 ; 4 - ; 5 - 10 ; 6 -
 ; 7 - ; 8 - ; 9 -

9,

- 9,

.9.3, ,

- 10,

8.

,

,

.

5 9.3, .

9.3.2.

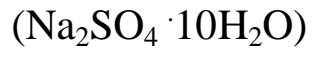
3 9.3,

. 9.6

9.6

$\rho,$							
	%,	-,	-,	Na ₂ SO ₄ ,	%,	-,	Na ₂ SO ₄ ,
	%,	%,	%,	%	%,	%,	%
< 20	65	15	15	5	25	75	-
	25	75	-	-	50	45	5
20...100	70	10	15	5	75	20	5
	75	20	-	10	-	-	-
>100	65	10	10	15	-	-	-
	25	50	-	25	-	-	-

(CaSO₄·H₂O)

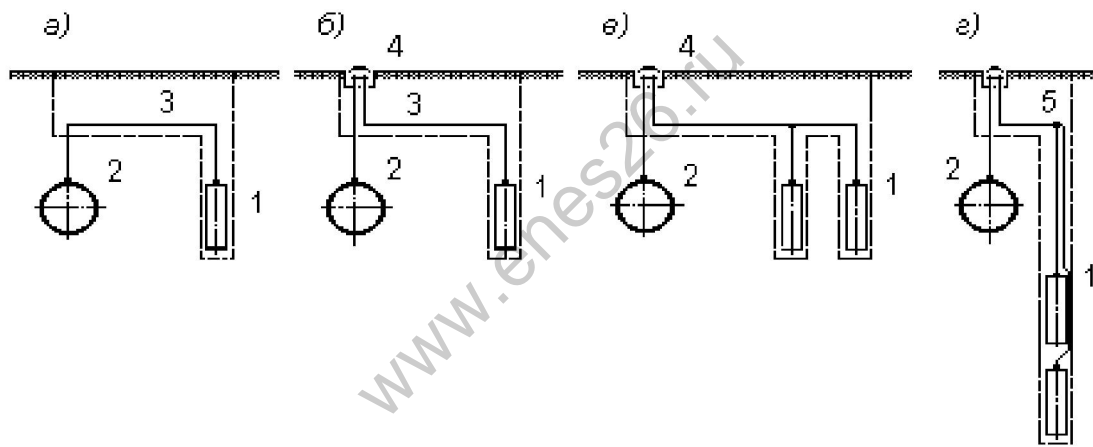


.9.6.

$\rho_a = 0,5...1,5$

9.3.3.

.9.4



.9.4.

() ; - N ; - ;
 . 1- ; 2- ;
 ; 3 - ; 4 - ;
 ; 5- .

(.9.4,)

5

(.9.4,).

.9.4,

3...5 ,

“ (I)
 I = 20...200 . ”

9.4.

9.4.1.

(=1) , ,
 , I = 0,2 .

www.enes26.ru

9.4.2.

- 7 .
.9.4.1.

U

U

(6.27),

(j)

(J = 0)

($\varphi_c = \text{var}$).

U

$\varphi_c = U$

, $\varphi_c =$

www.enes26.ru

(j),

(I)

=2

=2 “

”

9.4.3.

, -7 , U , -
 . U = 0,6 , -
 - U = 0,2
 20 (I)

$$I = U / R = 0,6 / (0,4\rho) = 1,5/\rho, \quad (9.4)$$

(j_c), (I_Σ)

$$I_{\Sigma} = j \cdot S_{\Sigma}, \quad (9.5)$$

S_Σ -

(n)

$$n = I_{\Sigma} / I . \quad (9.6)$$

.

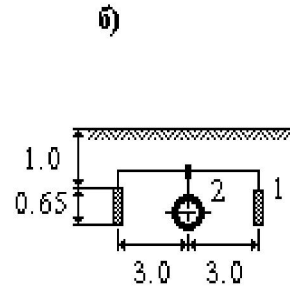
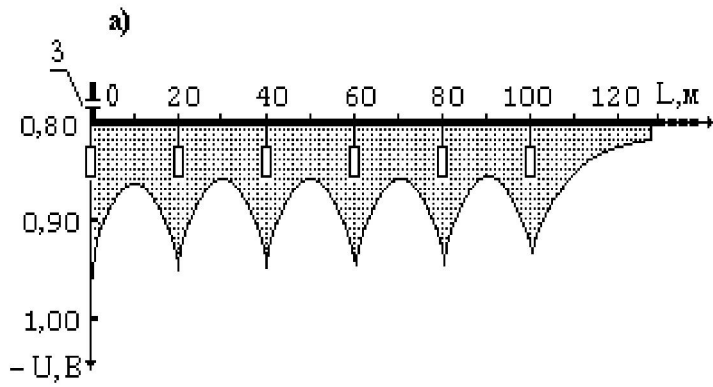
j

1

.9.5

d = 100

$$U = U = -0,75$$



$R = 100$
 $\rho = 20$

9.5.

; 3 -

()
 (): 1- ; 2

-20

$U = -1,5$, $d = 175$, $l = 650$,

$h = 1$.
 ,
 3

1.

.9.2, , :

$$= (1,54 - 1,51) / (5 - 1) = 0,0075 \cdot 2$$
 ()

$$R = / (\pi d) = 0,0075 / (3,14 \cdot 0,280) \approx 0,01$$
 ,
 d -

$$R = 10000$$
 .

3,6,12,...,2000 .
 3

www.enes26.ru

L=0)

5 U = -0,845 L = 0 U = -0,845 L = 6
 -0,938 () I = 0,112

2.

20

I = 0,112 .

.9.7,

.9.8

(U₃) : (y_a). (U₁)

9.8

R = 25						R = 250		
y _a ,	U ₁ ,	U ₃ ,	y _a ,	U ₁ ,	U ₃ ,	y _a ,	U ₁ ,	U ₃ ,
		B		B	B		B	B
1	-1,461	-0,717	8	-1,002	-0,865	0,5	-1,007	-0,824
2	-1,195	-0,800	10	-0,992	-0,870	1	-0,940	-0,846
3	-1,107	-0,828	15	-0,982	-0,877	2	-0,904	-0,855
4	-1,064	-0,842	20	-0,979	-0,879	3	-0,895	-0,860
5	-1,038	-0,851	50	-0,978	-0,880	5	-0,889	-0,866
6	-1,022	-0,857	∞	-0,978	-0,880	∞	-0,879	-0,866

.9.8

$$y_a \geq 5$$

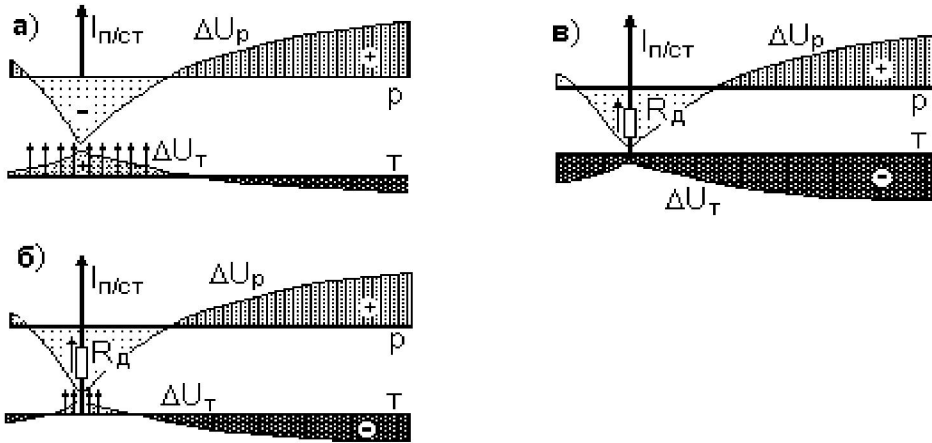
$$3 \leq y_a \leq 6$$

10.

10.1.

,
 4 ,
 - ,
 () ($\Delta U_p < 0$),
 ($\Delta U > 0$),
 ,
 (φ) ,
 (φ) , $\Delta U = \varphi - \varphi > 0$.
 , -
 .10.1
 (ΔU)
 ,
 ,

” , . . . (.10.1,). “



.10.1. () (), R . () () ()

www.enes26.ru

R

?

.10.1, .

() ,

(.10.1,).

(ΔU) ,

ΔU .

ΔU .

R

10.2.

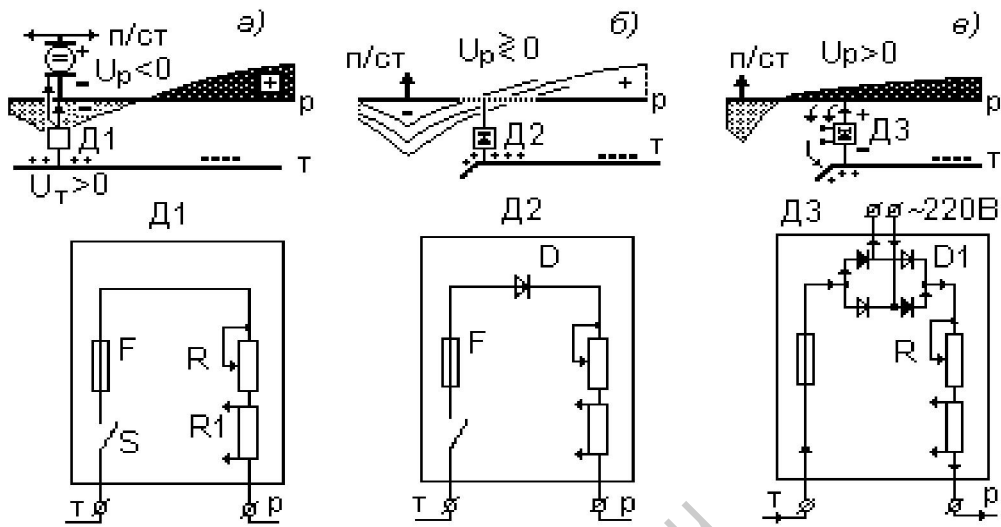
:

- ;

- ;

- .

.10.2



.10.2.

() () , 1... 3 -
 ; F- ; R - ; R1
 - () ; D -
 ; / - ; , -

10.2.1.

(.10.2, 1)

$$U < U , \tag{10.1}$$

U , U -

(10.1), $\varphi <$
 φ , φ $\varphi -$
 “ ” („, (4.1)).

10.2.2.

$$U \Leftrightarrow U \quad (10.2)$$

..
 .10.2,
 (10.2).

$U = 0 -$
 $U_p = U_c . , U_c . -$
 $U_p.$

), (. $U_p > U$

(-) .

(. 10.2,) .

()

U_p .

$U_{p=+1}$.

www.enes26.ru

2 .10.2

D

$U_p > U$

$U > U_p$

ó

-5

-3 . 500 -
 -3 1000 30 . -
 6
 () . -
 , 0,7 . -
 4- , 820 410 31 ,
 30 .
 -100 -200 60,100 200 : -60 ,
 10 0,05 . -
 - 665 365 285 .

10.2.3.

(. .10.2,)

$$U_p > U , \tag{10.3}$$

U_p ,

220 . - -

(. .10.2, 3).

“ ” - -
 , , - “ ” - , -
 3 .10.2 . , , -
 , .

– “ ”, , , ,
 . , -
 , , , - , ,
 - , , - , ,
 .
 -
 -
 -
 ()
 . ,
 ,
 (.
 ,
 -
 -
 -
 ()).
 -
 -
 .
 ,
 .

10.3.

10.3.1.

-7 . - - .
 -
 -

$$(BA - E)j = J - B(\varphi + \varphi_c), \quad (10.4)$$

$$U = R j + U_c .$$

φ .

1 , :

0,05 ?

www.enes26.ru

2...3

;

.

,

.

10.3.2.

(ΔL_p)

(. 7).

$\Delta L_{p.min} = 200$.

($\Delta L_{p.max}$)

25...35

$\Delta L_{p.max} = 2...4$

$N_p \geq 10$

$\Delta L_{p.max}$

N_p

?

N_p

1...2

10 / .

(, ± 20 !).

$\Delta L_{p.max} = 4000$.

8,

8 9 (8 7).

),
{ 8,9 }.

.10.3.3.

www.enes26.ru

- 7

5, 1 9,

5 -

. C

10

- 10

, ...

$($ $-$
 $),$ $.$
 $.$
 $-$ $,$
 $.$
 $,$
 $($ $,$ $)$
 $($ -7 $)$
 $-0,55$ $).$ $,$ 9
 $($ $.$ $),$ $9-$ $10-$
 $.$
 $,$ $,$ $.$
 $,$ $,$ $,$

 $.$ $,$ $,$ $.$
 $.$ $,$ $,$ $.$
 $)$ $-$
 $,$ $.$ $,$ $-$
 $,$ $P.$ $,$ $-$
 $)$
 $P+1,$ $.$ $P+1$
 $,$ $,$ $.$
 $)$ $-$
 $[P, P+1], \dots$ P $U \dots$

www.enes26.ru

10.3.5.

U ,

U

()

(U),

www.enes26.ru

U ,

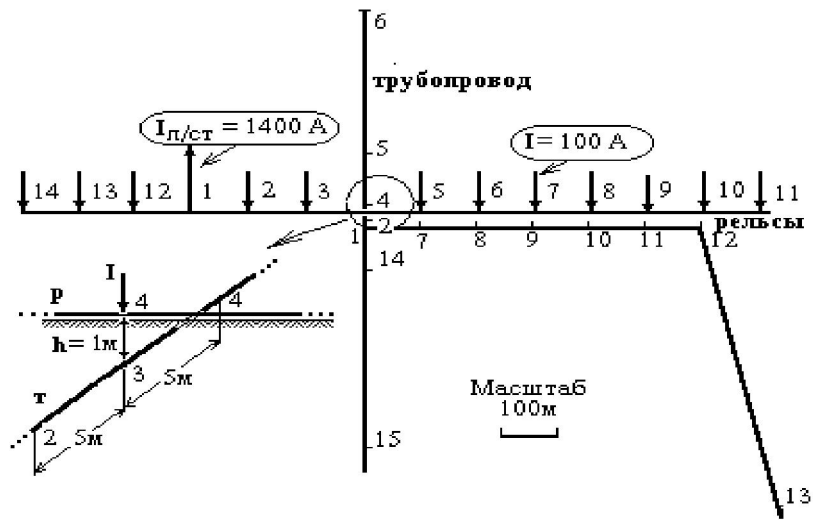
(10.4)

U

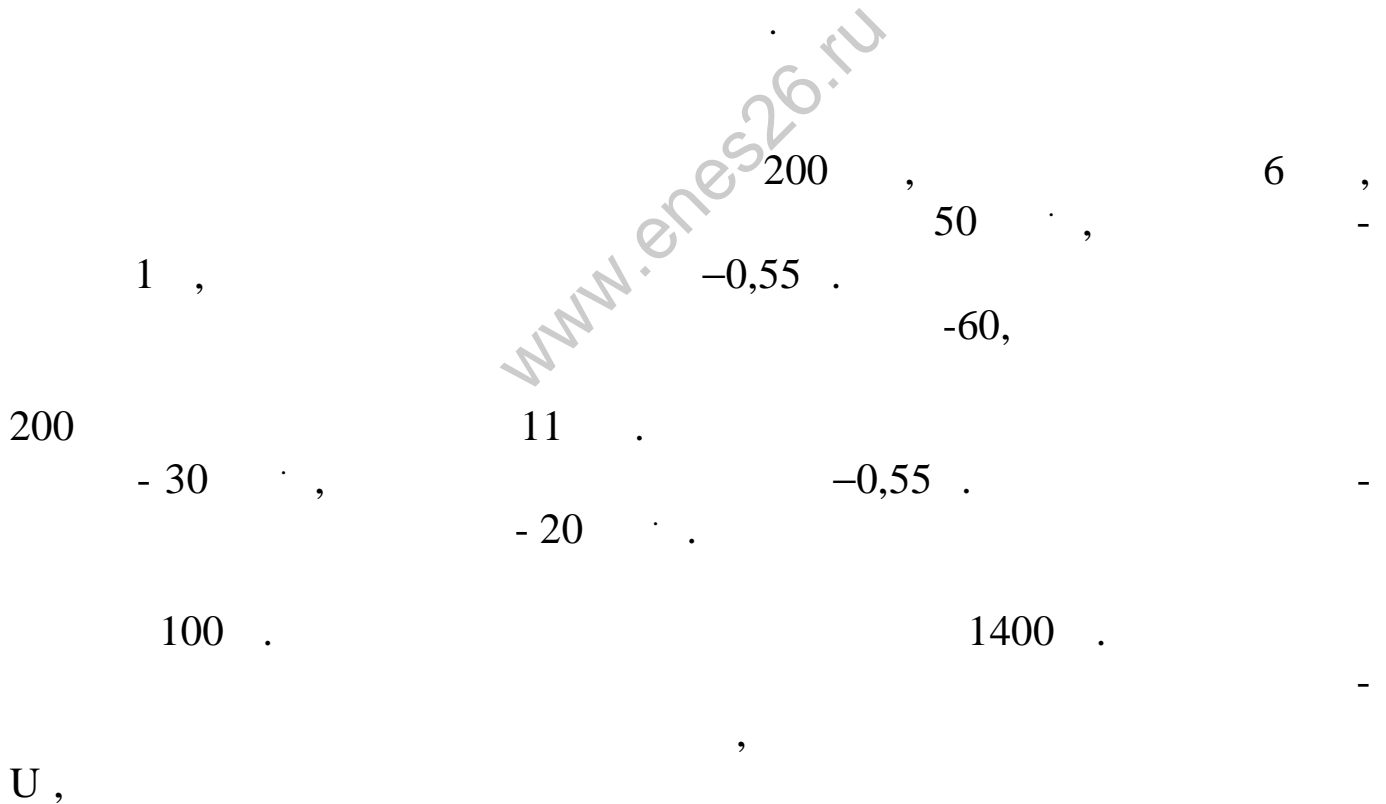
φ

10.3.6.

,
 =2 ' - -7 .
 : - .
 =1 " U ,
 www.enes26.ru
 20% ,
 , , , .
 _____ 1
 .10.3
 , 1 12 600
 - 10 .
 4,
 , " " .



.10.3.



.10.3, $I = 100A = \text{const};$

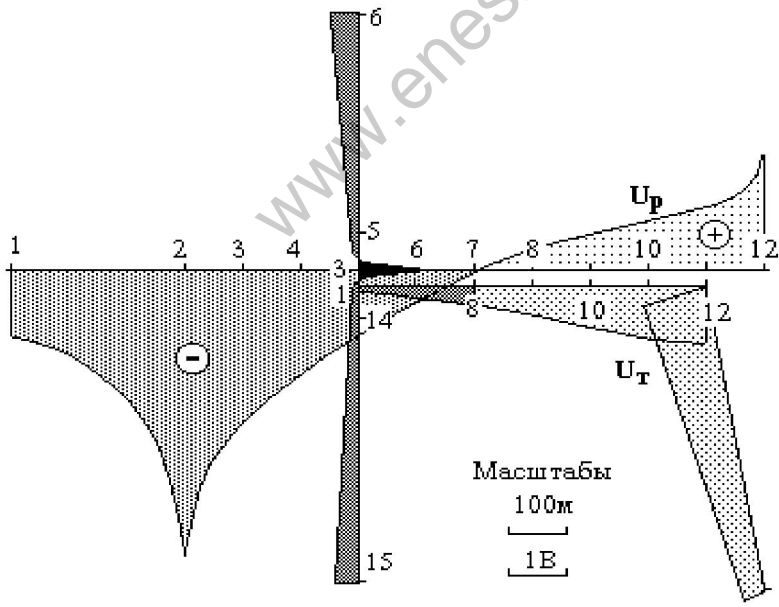
300A, $I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = 0$;

$I_{11} = 0$.

$I_{10} = I_{11} =$

$I_1 = I_2 = 300 \text{ A}, I_8 = I_9 = I_{10} =$

.10.4



.10.4.

() .

()

$$U = +1,176 \quad (\quad),$$

$$j = (1,176 - (-0,55)) / \quad .$$

0,1 . 2

$$v = 1,18 j = 20,2 \quad / \quad .$$

5

$$U = +0,065 ,$$

10.1

10.2

NN	, U , () -		
1	-0,127	-0,086	-0,312
2	0,065	0,100	-0,251
3	1,176	1,169	0,039
4	0,078	0,115	-0,243
5	-0,172	-0,113	-0,296
6	-0,515	-0,379	-0,310
7	-0,324	-0,359	-0,408
8	-0,566	-0,634	-0,521
9	-0,767	-0,795	-0,610
10	-0,927	-1,006	-0,838
11	-1,046	-1,260	-1,210
12	-1,124	-1,469	-1,419
13	-0,440	-0,272	-0,211
14	-0,234	-0,167	-0,308

NN	- , U , ()		
1	-1,33	-2,17	-0,57
2	-5,84	-7,50	-3,85
3	-3,08	-4,22	-1,71
4	-2,13	-3,17	-0,96
5	-1,39	-2,17	-0,57
6	-0,65	-1,20	-0,28
7	-0,07	-0,23	-0,09
8	0,40	0,64	0
9	0,78	1,41	0,02
10	1,07	2,10	0,03
11	1,28	2,74	0,03
12	2,28	4,70	0,21

15	-0,482	-0,336	-0,285
----	--------	--------	--------

U = U = -0,55) 8 (() -
 13, 15 6 ,) .

.10.1

(.) .

.10.2

.10.4).

U_p-

.8, U ≈ -0,55 .

www.enes26.ru

10.3

nm				nm			
1	-1,132	-1,087	-1,393	9	-1,802	-1,826	-1,723
2	-1,168	-1,128	-1,577	10	-1,893	-1,969	-1,877
3	-0,85	-0,85	-2,141	11	-1,943	-2,154	-2,175
4	-1,190	-1,149	-1,607	12	-1,967	-2,308	-2,326
5	-1,125	-1,184	-1,453	13	-1,034	-0,864	-0,85
6	-1,398	-1,258	-1,259	14	-1,249	-1,179	-1,401
7	-1,490	-1,520	-1,662	15	-1,491	-1,341	-1,375
8	-1,669	-1,732	-1,707	I ,	49,6	49,4	53,4

- , .
 .

 .10.3
 4 .10.2
 1 M=1
 .
 , -
 , , (3).
 (. .10.3)
 . ,
 1400 . , -
 .

www.enes26.ru

11.

11.1.

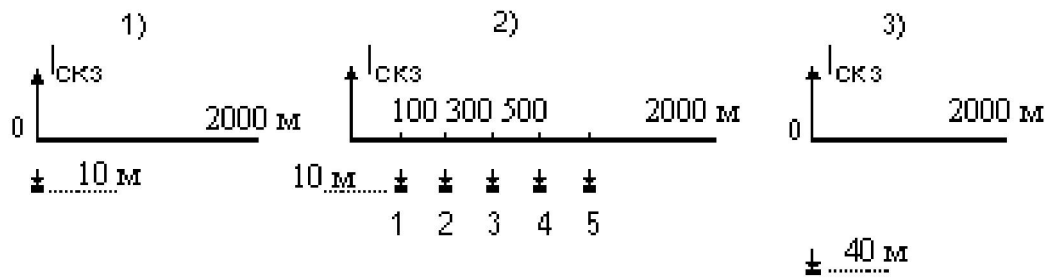
” “ -
 , ,
 . .
 , , -
 - , - -
 .

11.1.1.

www.enes26.ru

1

200 ,
 50 , 6 , 2000 -
 (.11.1):
 1 - ;
 2 - ;
 3 - .
 =1 - -7 -



.11.1.

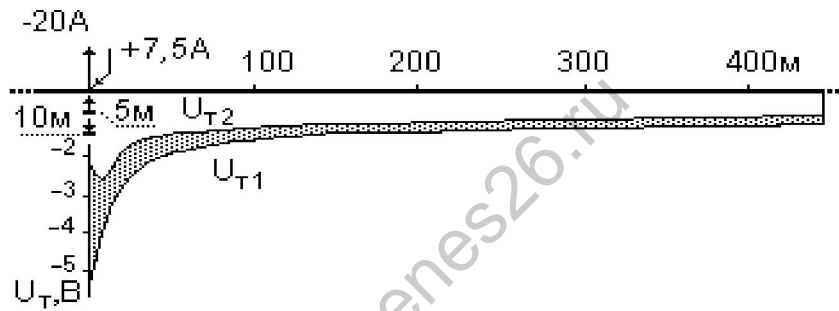
.11.1

11.1

,	-			,	-		
	1	2	3		1	2	3
0	-2,500	-1,662	-2,458	700	-0,700	1,010-	-0,986
50	-0,986	-1,510	-1,703	800	-0,691	-0,975	-0,959
100	-0,862	-2,500	-1,442	900	-0,683	-0,948	-0,937
150	-0,815	-1,579	-1,319	1000	-0,676	-0,925	-0,918
200	-0,789	-2,500	-1,246	1100	-0,671	-0,906	-0,901
250	-0,772	-1,546	-1,195	1200	-0,666	-0,891	-0,887
300	-0,758	-2,500	-1,156	1300	-0,662	-0,878	-0,875
350	-0,747	-1,461	-1,124	1400	-0,658	-0,867	-0,865
400	-0,737	-2,183	-1,097	1500	-0,656	-0,859	-0,858
450	-0,730	-1,265	-1,073	1600	-0,654	-0,853	-0,853
500	-0,723	-1,147	-1,052	1700	-0,653	-0,850	-0,850
550	-0,716	-1,094	-1,033	1800	-0,653	-0,851	-0,851
600	-0,710	-1,059	-1,016	1900	-0,656	-0,859	-0,859
650	-0,705	-1,032	-1,000	1950	-0,685	-0,942	-0,943

$$\frac{11.2}{2}$$

$$= -5,33$$



.11.2. (U_1) (U_2) .

$=2$ “ ”

11.1.3.

11.2

NN	,	$y = \infty$	$y = 1$	$y = 7$
1	0	-5,332	-2,819	-2,342
2	5	-4,816	-3,685	-2,537
3	10	-3,932	-3,435	-2,374
4	20	-2,783	-2,529	-1,868
5	40	-1,945	-1,797	-1,393
6	100	-1,400	-1,311	-1,067
7	200	-1,193	-1,126	-0,941
8	500	-1,005	-0,958	-0,827
9	1000	-0,873	-0,840	-0,747
10	2000	-0,865	-0,832	-0,742

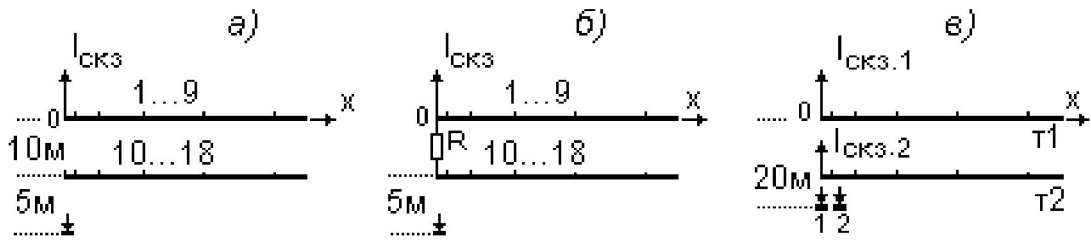
3

.11.2

 $(y = \infty)$ $y = 7$ $y = 1$

- 6 ,

200 ,
- 50 ,



.11.3.

) $I = 15A$, $x_a = 0$, $y_a = 15$;)
 150 ;) : $I_1 = 15A$, $I_2 = 50A$, $x_{a1} = 0$, $x_{a2} = 0$ ($z = 80$),
 $y_{a1} = y_{a2} = 20$.

11.3

NN	-	.11.3			
				$z=0$	$z=80$
1	0	-2,777	-1,334	-6,348	-2,651
2	10	-2,051	-1,460	-4,374	-2,085
3	20	-1,709	-1,204	-3,292	-1,875
4	40	-1,411	-0,942	-2,121	-1,805
5	80	-1,238	-0,790	-1,377	-2,616
6	200	-1,100	-0,705	-0,959	-0,935
7	500	-0,964	-0,662	-0,826	-0,857
8	1000	-0,838	-0,635	-0,790	-0,783
9	2000	-0,807	-0,640	-0,855	-0,797
10	0	-3,480	-2,800	-6,929	-2,256
11	10	-1,029	-1,090	-2,757	-1,192
12	20	-0,726	-0,740	-1,746	-0,976
13	40	-0,596	-0,647	-1,133	-0,919
14	80	-0,545	-0,596	-0,857	-2,698
15	100	-0,527	-0,571	-0,712	-0,599
16	500	-0,529	-0,560	-0,639	-0,579
17	1000	-0,538	-0,535	-0,595	-0,564
18	2000	-0,552	-0,552	-0,567	-0,556

(.11.3,), , -

10...13, ...

40

4,75

44

$$j' = \frac{1000}{0,00475} / .$$

$$d = 0,2$$

$$j'' = 0,00755 / ^2,$$

$$v = 0,00895 / .$$

$$s = 0,05,$$

0,18 / ,

(.11.3,)

150²

10

900

70

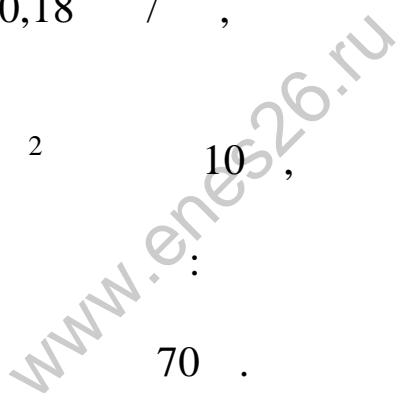
15

50

10

(.11.3,),

(.11.3, .1),



0, $y_2 = 0$ $y_{a1} = 20, y_{a2} = 20$ ().

($y_2 = 80$, $y_{a2} = 0$),

11.2.2.

5
11.4

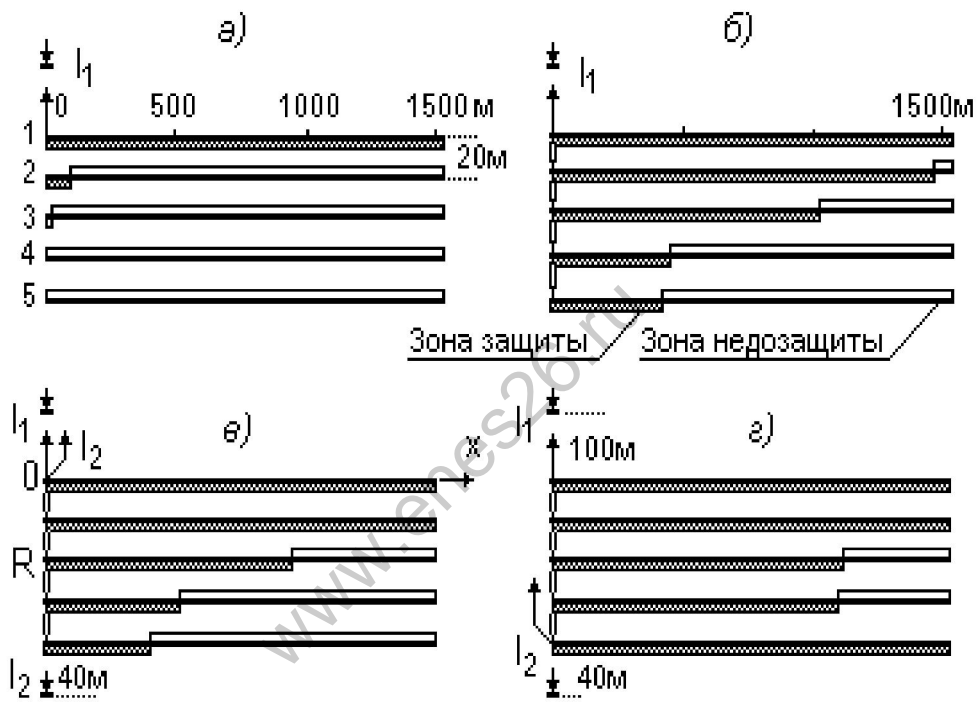
- 150

20

- 200

www.enes26.ru

20 A. $I_1 = 50 \text{ A}$, $I_2 =$
 (.11.4,) $=150$ $+0,06$.



.11.4.

“ ”

1; -

R

; -

; -

(.11.4,)

(.11.4,) - 70 - 5-
 2- 3-
 (.11.4,).
 -7 .
 .11.4
 (=0)

11.4

	1	2	3	4	5
-20	-3.377	-2.332	-1.871	-1.779	-2.090
0	-2,348	-1.354	-1.141	-0.979	-1.450
20	-3.319	-2.282	-1.826	-1.738	-2.053
40	-3.314	-2.325	-1.855	-1.719	-1.867

“ ” !
 1) ,
 2) ($\Delta U_1 < 0$);
 ($\Delta U_2 > 0$);

3)

$$(\Delta U_3 > 0),$$

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3.$$

$$(\Delta U > 0),$$

 ΔU

.11.4,

.11.4

(U)

$$U = U + \Delta U, \quad U < 0 -$$

$$\Delta U > 0 -$$

(-)

11.2.3.

$$\frac{\quad}{.11.5} \quad 6$$

0,5

- 0,5

$U = -0,55$) . 15

(1...7)

1...16
19...20,

$\Delta U / \Delta L_{19-20} = (U_{19} - U_{20}) / 20 = 0,0018 /$;

$\Delta U / \Delta L_{1-16} = (U_1 - U_{16}) / 0,5 = 0,076 /$.

$\Delta U / \Delta L_{1-16} < \Delta U / \Delta L_{19-20}$, . .

i- k-

$\Delta U / \Delta L_{ik}$

$\Delta U / \Delta L_{ik} = ((\varphi_i - \varphi_i) - (\varphi_k - \varphi_k)) / \Delta L_{ik} = (\varphi_k - \varphi_i) / \Delta L_{ik}$, (11.1)

(φ)

(j)

$j_{ik} = - \Delta U / \Delta L_{ik} / \rho$. (11.2)

1.

15

20

3 9

(.22)

($U_{.max} = -2,5$),
 $2,3$ 4 - : -
 $-0,82$.

2. -2 $4,$
 $y_2 = 10$, $y_{a2} = 10$.

$I_1 = 13,3$, $I_2 = 1,9$, $U_9 = -1,937$, $U_2 = -0,85$ В.

$15,2$, , $1,$

3. -2 -1 ,
 20 , $U_{.min} < U < U_{.max}$
 $I_1 = 21,5$. 3

www.enes26.ru

11.2.4.

$$\frac{7}{.11.6}$$

« » c 15 А,
 45° .

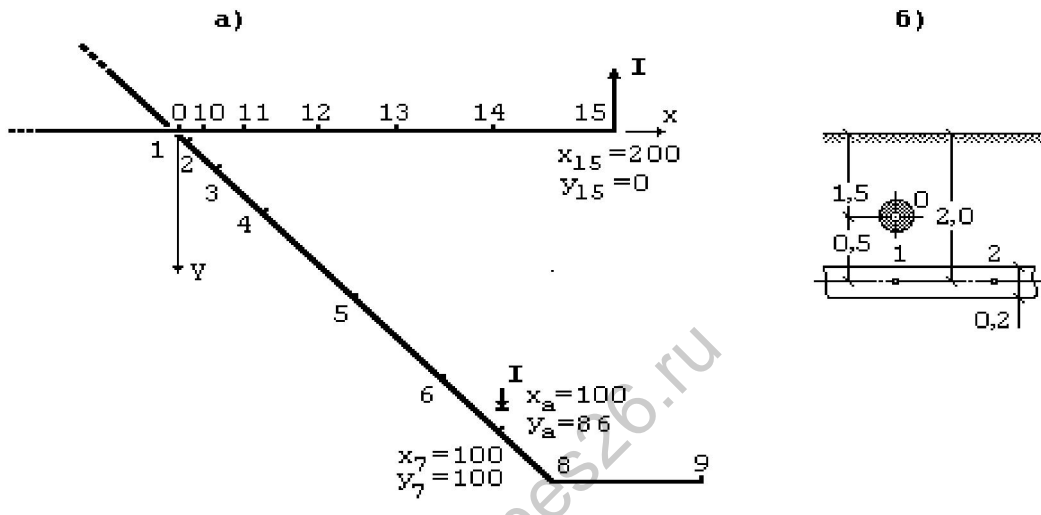
.11.6.

1...5

$$\Delta U_1 = +0,57$$

($U = -0,55$).
 $R = 50$.
 $d =$
 0,2

$$j_1 = 0,5 / (\pi d R) = 0,016 \text{ / } ^2.$$



.11.6.

$$P_a = 0,5$$

$$s = P_a / (\pi d R) = 0,016.$$

$$v_1 = 1,18 j_1 / s = 1,18 \text{ / } .$$

12,2 . 1 0

-0,85 , (.15) -1,21 . -
 (.7), -2,59 . -

11.6

Nn	x,	y,	U,B	Nn	x,	y,	U,B
1	0	0	0,021	0	0	0	-1,620
2	1	1	-0,021	10	1	0	-1,598
3	3	3	-0,088	11	3	0	-1,568
4	10	10	-0,195	12	10	0	-1,533
5	30	30	-0,338	13	30	0	-1,523
6	70	70	-0,855	14	60	0	-1,550
7	100	100	-2,066	15	200	0	-1,788
8	130	130	-0,608				
9	250	130	-0,318				

11.3.

, , -
 , -
 , , -
 , , -
 () (). -
 . -
 , -

$$\Delta U' = \Delta U'',$$

(6.42) Z_u', Z_u'' - “ ” (.
 ; $\Delta U', \Delta U''$ - “ ”

1.

2.

3.

:

-

-

-

-

I

(6.42)

Z_u ;

R .

$$R . = R . Z_u / Z_{u.} , \tag{11.4}$$

Z_u -

(11.4)

(11.3)

(6.42)

(6.5),

$$\begin{aligned} j' R'' &= I' Z'_u ; \\ j'' R'' &= I'' Z''_u . \end{aligned} \tag{11.5}$$

$$j' / j'' = I' / I'',$$

(11.5),

$$R'' = R'' \cdot Z'_u / Z''_u (I' j'' / I'' j').$$

(11.6)

(11.4).

1,

_____ 8

.11.7, ,

24

50

40 40 4.

$$R = 2 \cdot \dots^2,$$

0,5 \cdot \dots^2, -

, R =

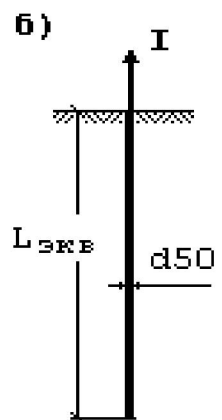
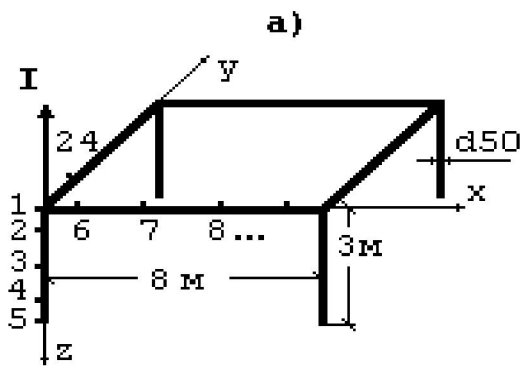
, R -

(\dots).

\rho =

20 \cdot \dots

www.enes26.ru



.11.7.

()

().

- (.11.7,): $Z_u = 0,183$;
 - (.11.7,): $L = 18$, $d = 50 \times 2$, $Z_u = 0,679$, $R = 2 \cdot 2$;
 - (.11.7,): $L = 18$, $d = 50 \times 2$, $R = 2 \cdot 0,183 / 0,679 = 0,539$.

Z_u
 2,5 %.

8x8

11.3.2.

$Z_u = 0,183$, $I = \Delta U / Z_u$, $U = -0,85$, U
 $= -0,55$, $I = 1,64$.
 $I_c = 16$ 10%,

9

(.11.8).

$$- 100 \cdot \frac{- 200 \cdot 6}{2}, \quad - 3000$$

$$- 20 \cdot \dots$$

$$Z_u = 0,183 \dots$$

.11.7, .

.11.7,

$$L = 45$$

$$, d = 50 \text{ 1}$$

$$R = 1,4 \cdot 2, \quad 1\%.$$

Z_u

$$- 17,$$

$$- 4.$$

1-8

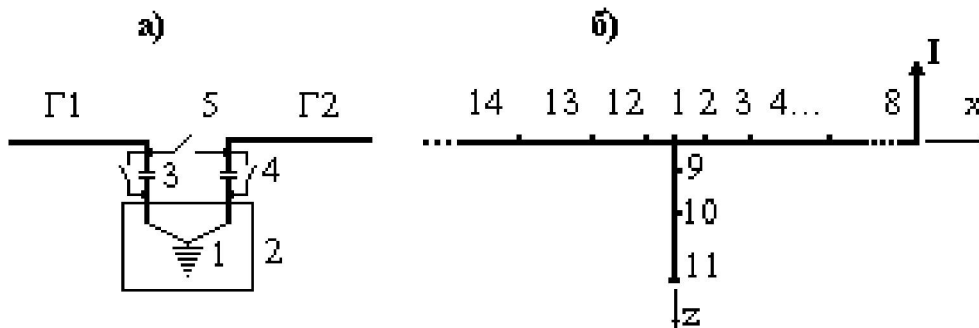
.11.7.

1.

$$-2,5 < U < -0,85 \dots$$

8,

$$(1, = 0).$$



.11.8.

1 2 (),

1 2 3

4 5;

9...11

11.7

nm	x,	, U , ,				
		1	2	3	4	5
1	0	-0,777	-0,851	-0,863	-1,010	-0,850
2	5	-0,997	-1,144	-0,863	-1,013	-1,146
3	15	-1,063	-1,231	-0,864	-1,018	-1,242
4	50	-1,124	-1,313	-0,867	-1,041	-1,360
5	150	-1,171	-1,375	-0,875	-1,105	-1,520
6	500	-1,261	-1,495	-0,910	-0,929	-1,208
7	1000	-1,422	-1,708	-0,982	-0,858	-1,083
8	2000	-2,500	-3,141	-1,493	-0,850	-1,070
CK ,		17,9	23,8	8,5	6,9	13.1

2. , .
 8 (= 2000),
 $U_{min} = -0,85$,
 $I = 17,9$ $I = 23,8$.

3. ,
 $I = 8,5$

4. 5, .

5. , 4, .

(- 5). -

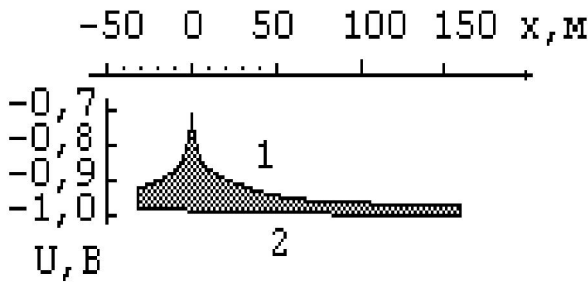
$I = 10,6$, $I = 13,1$



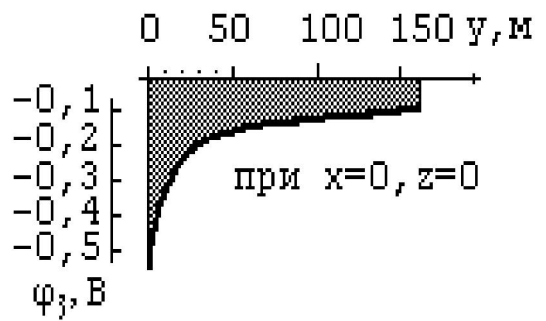
“ ” . 11.8,
 (U) = 0
 : U
 $U_1 - U_2 = 0,29$.

$\varphi = -0,44$ (.11.8,) .

a)



б)



.11.8.

: 1 -

, 2 -

11.3.3.

30...100 ,

L_z (.11.10,)
 “ ” Z_u .

L_z

(.11.10,).

R . ,

L_z .11.10.

$$\frac{10}{L_z = 60} ,$$

$d = 200 \times 6$,

20 .

R .

- $\rho =$

Z_U

R .

R .

(. R Z_U (11.5)).

www.enes26.ru

$$R = 15 < R < 150$$

$$Z_U = 1,8 \pm 0,75$$

$$R = 1000 \quad Z_U = 1 \quad (R = 50)$$

20

12,2...12,7,

= 6,5...7,5.

=

-

.

-

.

-

>11,8

,

11,8

-

-

.

-

-

-

-

60 %.

www.enes26.ru

12.3.

12.3.1.

.

+0,06

, ...

$$\Delta U = 0,059 \quad , \quad (12.1)$$

ΔU -

,

=13

(=7

)

$\Delta U = 0,35$

-

-

:

-

-

;

-

-

;

-

-

$$\varphi_a = -0,55$$

,

$$\varphi = -0,2$$

-

-

12.3.2.

.12.1

$$\Delta U = -0,3$$

$$= 3$$

$$\cdot 2$$

$$j = 100 / 2,$$

$$100$$

$$/ 2$$

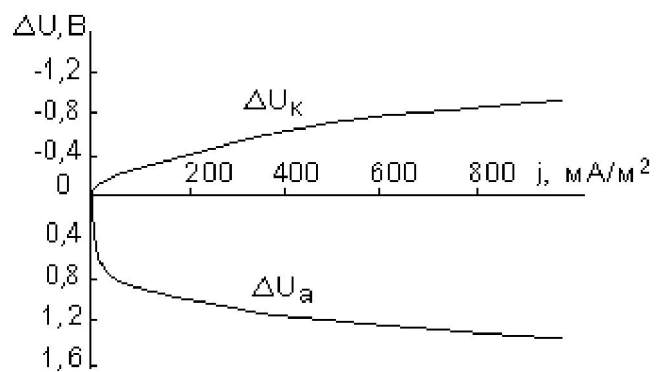
$$= 2...4$$

$$\cdot 2$$

www.enes26.ru

, . . .

(. . . 6).



.12.1.

www.enes26.ru

= 3 . 2 .

12.3.3.

U_a .12.1 ,

$j = 200 / ^2$
 $\Delta U_a = 1$
 $= 5 \cdot ^2$

:

,

$= 0,1...0,5 \cdot ^2$,

$> 5 \cdot ^2$.

,

,

12.4.

-7

d
(R)

6.

“ ”

$$t = d / 2.$$

12.4.1.

N

d ,

$$d = \eta n d \quad , \quad (12.2)$$

η - , n = 2 η = 0,9, n = 3 η = 0,88, n = 4 η = 0,85.
 (R) ()

12.4.2.

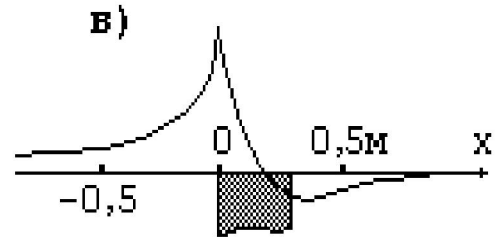
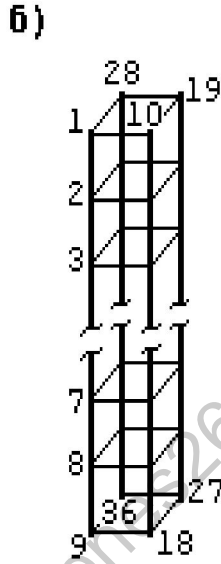
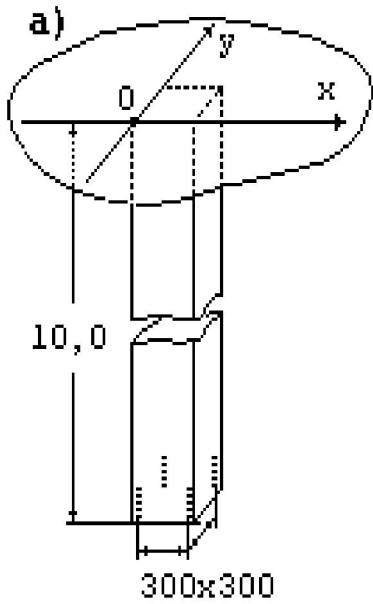
www.enes26.ru

1

10 , 350×350 , ρ = 20 , 20 , 300×300 , .12.2

($\varphi = -0,4 \dots -0,6$ = var, $P = 2 \dots 0,2$ $\cdot^2 = \text{var}$),
 ($\varphi = -0,2$, $P = 2 \dots \cdot^2$).

$\Delta L = 0,5$, $-\Delta L = 1 \dots 3$.



.12.2.

()
 1...9.

φ (), $0 = 0, z = 0$

1.

$0 \dots 0,5$, $1, 10, 19$ 28

$0,1 < < 2 \cdot^2$,

$\varphi = -0,2$ (-

) $\varphi = -0,6$ ()
).

.12.1. V_{max}

($\rightarrow 0,2$ $\cdot 2$),

(V_{max}).

12.A

-	, 2	φ ,	U ,	j , / 2	j_{max} , / 2	V_{max} , /
1	2	-0,4	-0,313	41,4	414,0	0,497
2	0,5	-0,5	-0,456	81,2	202,5	0,244
3	0,2	-0,6	-0,587	125,8	125,8	0,151

www.enes2b.ru

(j)

2.

, 1, - 9,18,27 36 (.12.2).
 , 20% , = 2
 $\varphi = -0,4$
 $V_{max} = 0,611$ / - 9,18,27,36;
 $V_{max} = 0,497$ / - 1,10,19,28.

3.

(1... 9).

.12.2

(= 2 · 2, φ = -0,4).

10% ,

j / j_{max} = 0,1.

12.2

nn -	z,	U , B	j , / 2	j _{max} , / 2	V _{max} , /
1	0	-0,321	38,2	382	0,458
2	0,5	-0,307	44,5	445	0,535
...
8	9,5	-0,307	44,5	445	0,535
9	10	-0,295	50,8	508	0,611

V_{max}

9

$$V_{\max} = 0,573 / - 1;$$

$$V_{\max} = 0,458 / - 1... 9.$$

4.

? “ ”

- -7

«

».

.12.2, (φ) 0
 ,
 ,
 = 0,2 · 2, φ = -0,6 .
 , Δφ .max = 0,138 .
 1,10,19,28, Δφ .max = 0,246 ,
 9,18,27,36). (

12.4.3.

www.enes26.ru

,
 ,
 ,
 ,
 .
 .12.4.2 I
 “ Z = ΔU / I (Z_u).
 .
 :
 L - ;
 d - ;
 t - ;
 ;
 πdt = nπd_c² / 4, d_c - ;
 n - ;

..., $R = 2 \cdot \dots^2$.

Z .

$$(R) \quad (11.4)$$

$$R = R \cdot Z / Z \quad (12.3)$$

d, t R .

2

(.12.3)

4-

$$\rho = 20$$

?

20

50x24
300x300 ,

1 .

.12.3, ,

.12.3, .

0,5 ,

$$L = 2 \cdot 5 ($$

!), . .

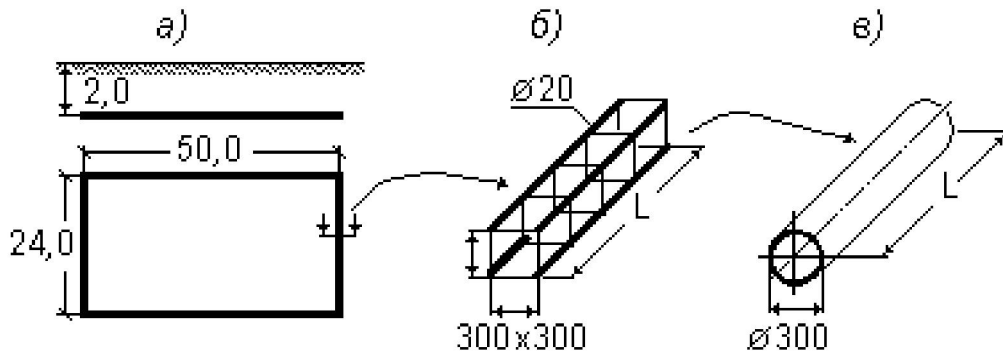
(.12.3,).

- 0,3 .

20 , . .

- 10 ,

$$\varphi = -0,2$$



.12.3.

(), -

() -
().

2.

(Z) L -

.12.3,

3, -

= 1).

(I =

0,318 ,

$\Delta U = -0,65$,
 $Z = 2,04$.

3.

: - 300 ,

$R = 2 \cdot 2$,
- 5,

$\varphi = -0,2$,
3, - 0,318 .

:
0,282 ,

$\Delta U = -0,482 - (-0,2) = -$
 $Z = 0,888$.

4.

$Z = 0,888$

$R = 2 \cdot 2$ -

R ,

(12.3)

$$R = R \cdot Z / Z = 2 \cdot 2,04 / 0,888 = 4,6 \cdot 2$$

4,6 · 2 - , R = 2 · 2 - , R = -

5. R = 4,6 · 2. I = 0,318

.2 -0,89 , -0,85 . -
- 0,04 , - 5% .

6. R (12.3), . .

R = 4,6 · 2 Z = (0,89 - 0,2) / 0,318 = 2,17 .

R = R · Z / Z = 4,6 · 2,04 / 2,17 = 4,34 · 2.

R , 2%, -

7. , , -

20 , 300×300 4-
: d = 300 , t = 3 , R = 4,34

. 2. - , -

8. , , -

50×24 , 8 -
(-

). -

I = 22,44 .

9. (I) .2. 148 -
 ,
 -

$$I = \frac{0,318}{2 \cdot 148} = 0,00108 \text{ ,}$$

.8.

10. , ,
 ,
) , (> 0,15 -
)

_____ 3

.12.4. , . . . 4 20 -
 300 . $\rho = 20$. -
 , , -

1. , ,
 1. . -
 1 -
 , 2, -
 :

$$d = 300 \text{ , } t = 3 \text{ ,}$$

$$R = 4,3 \cdot 2.$$

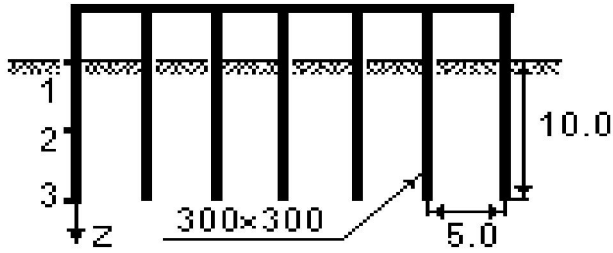
2. -
 (2), -

www.enes26.ru

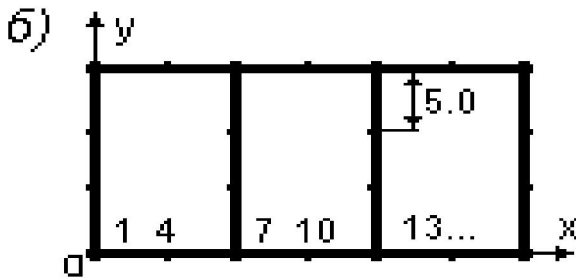
1,

2.

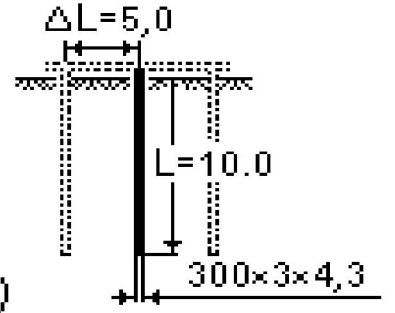
a)



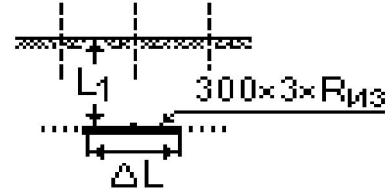
б)



в)



г)



.12.4.

()

()

() ()

- 22,

- 10 .

$\Delta L = 5$,

www.enes26.ru

(

3

!)

(12.2).

$$R = 10000 \cdot 2$$

2 (.12.4,)

66

$$\Delta L = 5$$

(

)

” ($x_a = y_a = z_a = 10000$) .

$$\varphi = -0,2$$

2,17 . $- I_1 = 3,67$, $I = 80,7$, $- I_2 =$

3- 10

$$I = (2,5\Delta U_i + 5 \Delta U_{i+1} + 2,5 \Delta U_{i+2}) / R' \quad (12.4)$$

i - k- , $k = 1,2; R' = R / (\pi d)$ -
 , ; $\Delta U_i / R'$ -

i- , / .

0,461 . Z $Z_1 = 0,457$, $Z_2 =$
 ΔU

$Z = 0,46$.

3. “ ” 2 3.

ΔL

$= 2 \cdot 2$, $\Delta L = 5$,

$d = 300$, $t = 3$, R .
 $L_1 = 5$.

$\Delta U = -0,65$

$I = 1,835$,

$Z = 0,354$.

3 (. 12.4,)
 (12.3),

$$R = 20,46 / 0,354 = 2,6 \cdot 10^2 .$$

4. “ ” 4, -
 , I

$= 80,7$ A

2 -

4

, . . . L = 220

()

I = 61,6 ,

23,5% .

)

4 -

I = 60,9 ,

-

)

4

-

L = 300

I = 79,2 ,

2%.

-

-

-

5.

4

-

12.5.

www.enes26.ru

6,

-

, . . .

-

,

-

:

-

,

-

.

-

,

.

$$R_j = \varphi - \varphi - \varphi, \quad (12.5)$$

$j -$, $/^2$; $\varphi -$; $\varphi - -$; $\varphi -$.

$$j = -1/\rho \partial\varphi/\partial n, \quad (12.6)$$

$n -$, $n (.12.5)$.
(12.5) (12.6),

$$\varphi - (R/\rho) \partial\varphi/\partial n = \varphi - \varphi. \quad (12.7)$$

$$|\varphi(\cdot) - (R(\cdot)/\rho) \partial\varphi(\cdot)/\partial n|_L = \varphi(\cdot) - \varphi(\cdot); \quad (12.8)$$

$$\varphi = \begin{cases} \varphi & \in L \\ \varphi & \in L \end{cases} \quad L = L + L ;$$

$L, L -$

; $\varphi, \varphi -$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial n}\right)_{\pm} = \pm \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (12.7).$$

12.5.2.

$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_L \frac{\mu(Q) dl_Q}{r_{MQ}} \quad (6.19),$$

$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{\rho}{\pi} \int_L \mu(Q) \ln(1/r_{MQ}) dl_Q \quad (12.9)$$

r_{MQ} - расстояние от элемента dl_Q до точки наблюдения \mathbf{r} ; l_Q - элемент длины.

$(\partial\varphi/\partial n)$

$$\frac{\partial \varphi(\mathbf{r})}{\partial n} = \left(\frac{\partial \varphi(\mathbf{r})}{\partial n}\right)_0 \pm \pi\mu(\mathbf{r}), \quad (12.10)$$

Из (12.9) и (12.10) следует, что потенциал и его нормальная производная непрерывны в каждой точке пространства, не принадлежащей к проводнику. На поверхности проводника потенциал и его нормальная производная имеют скачок, равный $\pm \pi\mu$. Знак «+» относится к внешней поверхности, а «-» к внутренней.

$$\frac{\partial}{\partial n}(\ln(1/r_{MQ})) = -\cos \psi / r_{MQ}, \tag{12.11}$$

(12.5). ψ - M Q

$$\cos \psi = -r_{MQ} / d. \tag{12.12}$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial n}\right)_0 = \rho / \pi d \int_L \mu(Q) dl_Q. \tag{12.13}$$

1/ρ, (12.11) (12.12) (12.10) (12.8)

(12.13), (12.8) (12.7), R / ρ

μ() -

$$R \mu() + \int_L \mu(Q) K(M, Q) dl_Q = \phi - \phi, \tag{12.14}$$

$$K(M, Q) = \rho / \pi \ln(1/r_{MQ}) - R / (\pi d) -$$

12.5.3.

N (12.14) L

$$\Delta L = \pi d / N, -$$

μ() = const. (12.14)

N-

$$R_i \mu_i + \Delta L \sum_{k=1}^{k=N} \mu_k a_{ik} = \varphi_i - \varphi_{i-1}, \quad (12.15)$$

$$a_{ik} = \int_{l_k}^{l_k + \Delta L} K(M_i, Q_k) dl_k, \quad (12.15')$$

$$i- \quad Q, \quad , \quad k- \quad - \quad . \quad (12.15)$$

$$\mu = \varphi, \quad (12.16)$$

$$= \{a_{ik}\}_{1..N} -$$

$$a_{ik} = \Delta L \left(\rho / \pi \ln(1/r_{ik}) - R_i / (\pi d) \right) + R_i \delta_i;$$

$$r_{ik} = 0,5 \sqrt{2} d \sqrt{1 - \cos \theta_{ik}};$$

$$\theta_{ik} = 2\pi / N |i - k|;$$

$$\delta_i = 1 \quad i = k;$$

$$\delta_i = 0 \quad i \neq k;$$

$$\varphi = \{\varphi_i\}_{1..N} -$$

$$\varphi_i = \begin{cases} \varphi_i - \varphi & i = 1..N_a; \\ \varphi_i - \varphi & i = N_a + 1 \dots N, \end{cases} \quad (12.16')$$

$N_a -$

(12.16)

$\varphi_{i,} \dots$

$\varphi = \text{const},$

0. (12.16')

$\varphi =$
 $:\varphi_i = -\varphi$

$\varphi_i = -\varphi$

M_i

Q_k

$i = r$

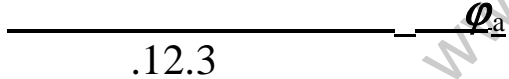
$r_{ik} > 0.$

$r_{ik} = \Delta L.$

12.5.4.

EZST

-6



.12.3

$d = 20$

2 $\cdot^2, \rho = 20$

φ

1:12

(s)

80

6

.12.3

(6), ...

12.3

	$\varphi_a,$	s	j,	$j_{\max},$	$V_{\max},$
--	--------------	---	----	-------------	-------------

\cdot^2	B		$/^2$	$/^2$	$/$
2	-0,4	0,1	0,090	0,900	1,062
0,5	-0,5	0,4	0,417	1,042	1,230
0,2	-0,6	1	0,963	0,963	1,136

, .12.3, -
 φ_a ,

$= 0,2 \cdot^2, \varphi_a = -0,6 \quad d = 20 \quad (\rho) \quad 20$

$v_{\max} = 1,254 \quad / \quad \rho = 5 \quad ;$
 $v_{\max} = 0,823 \quad / \quad \rho = 100 \quad ;$

$\rho,$

(d) $= 0,2 \cdot^2, \varphi_a = -0,6 \quad \rho = 20$

$v_{\max} = 1,211 \quad / \quad d = 10 \quad ;$
 $v_{\max} = 1,074 \quad / \quad d = 30 \quad .$

.12.4

$d = 20 \quad N = 80 \quad = 0,2 \cdot^2, \varphi_a = -0,6 \quad (N) \quad \rho = 20 \quad (N)$

12.4

N_a	N	$v_{\max},$
-------	---	-------------

.12.4, -

www.enes26.ru

13. . . , . . . , 1990.-85 .
14. . . . : -
 , 1977.- 67 .
15. . . . : .
 ∴ , 1984.-272 .
16. . . , ∴ -
 , 1979.-264 .
17. . . , . . , . . , 1968.-
- 99 .
18. : / . . ,
 . . ∴ , 1987.-375 .
19. / .
 . . ∴ , 1971.-250 .
20. . . -
 . ∴ , 1961.-87 .
21. . . . -
 . ∴ , 1968. -296 .
21. . . ∴ . 1984. – 400 .
21. . . -
 . . . 1962. – 289 .
22. . . .
 ∴ , 1987.-97 .
23. . . -
 . ∴ , 1979.-188 .
24. . . ∴ ,
- 1991.
25. / . . ,
 . . , . . : . . , 1980.-251 .
26. -
 ,

- 50 . -39.10-004-99. « » . : .2000.-
26. . ,, . ,, . ,, , . . , . : ,
- 1980.-536 .
27. . . . : - ,1982. -176 .
28. . . . : , 1984.-208 . -
29. . . . : , 1972. -120 . -
30. . . . : ,
- 1988.-136 .
31. . . . : , 1980.-438 .
32. . ,, . ,, . . , 1979.-395 .
33. / . ,, . ,, . : .1997.-118 .
34. - / - , 1991.-221 .
35. : , 1963. -238 . -
35. . ,, : .1967.-248 . -
36. . ,, . . , 1983.-344 . -
37. . . . : , 1982.-52 . -
38. . . . : // . - : . , 1985.

39. -
 // -
 , 1989. .13-19.
40. -
 /. ∴
- . .6.04.88. 1532- -137 .
41. ∴
- , 1960.
42. ∴
- 25812-83. ∴ .
- 1983.
43. . . , -
 . ∴ , 1989.-456 .
44. . . , . . , . . -
 . ∴ , 1958.-142 .
44. -
 . ∴ . 1977. – 320 .
45. /
- . . . , ∴ . -
 , 1988.-245 .