

С С С Р
МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

621.3.014.6.052.1

Б.Г. Дубровский

ИССЛЕДОВАНИЕ БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ
ПОДЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗ-
НЫХ ДОРОГ ТИПА МЕТРОПОЛИТЕНОВ

(435. Электрификация и электроснабжение
железнодорожного транспорта)

А в т о р е ф е р а т

диссертации, представленной на соис-
кание ученой степени кандидата техни-
ческих наук

Днепропетровск
1989 г.

НТБ
ДНУЖТ

Днепропетровский институт инженеров железнодорожно -
го транспорта направляет Вам автореферат кандидатской дис-
сертации инженера Б.Г.Дубровского.

ых лиц Вашего уч -
ащите диссертации
лярах).

ком институте инже -

ЮМАЗОВ

ки СССР, доктор
КОВСКИЙ;

А.Б.ДЕМИДЕНКО.

Автореферат разослан 24 января 1969 г. Защита диссер-
тации состоится 25 февраля 1969 г. на заседании
Ученого совета Днепропетровского института инженеров ж.д.
транспорта г. Днепропетровск, 10 ул. Университетская, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке инсти-
тута.

Ученый секретарь Совета

Ю.А. РАДЗИХОВСКИЙ

Введение

Защита от коррозии машин, оборудования, зданий, сооружений и подземных коммуникаций – задача большого народохозяйственного значения.

На особом месте среди многих задач защиты от коррозии стоят вопросы защиты от коррозии, вызываемой блуждающими токами.

В настоящее время вопросы теории и практики борьбы с коррозией, вызываемой блуждающими токами наземного электрического рельсового транспорта разработаны достаточно полно. В трудах советских и зарубежных ученых даны решения основных задач теории распространения этих блуждающих токов и их влияния на подземные металлические сооружения. Методические вопросы, касающиеся способов оценки коррозионной опасности и техники выполнения противокоррозионных мероприятий, детально освещены в различных инструкциях и руководствах.

В значительно меньшей степени уделялось внимание вопросам электрокоррозии, вызываемой блуждающими токами подземного электрического рельсового транспорта.

Электрическая тяга является распространенным видом тяги на рельсовом транспорте в большинстве отраслей горнодобывающей промышленности. Протяженность тоннелей на магистральных электрифицированных линиях МПС составляет десятки километров. Широкое распространение получили метрополитены – один из наиболее удобных видов массового общественного городского транспорта.

Вопросы коррозии обделок тоннелей и блуждающих токов подземного электрифицированного транспорта в отечественной и зарубежной литературе освещены чрезвычайно слабо. С начала развития отечественного тоннелестроения основное внимание было уделено проблеме коррозионной стойкости бетона, находящегося под действием фильтрующейся через тело тоннеля агрессивной грунтовой воды. Влиянию блуждающих токов придавалось второстепенное значение, хотя на

основе опыта эксплуатации тоннелей был сделан вывод о необходимости борьбы с ними.

В целом состояние изучения закономерностей распространения блуждающих токов подземных электрических железных дорог характеризуется следующим.

Имеется ряд экспериментальных данных, свидетельствующих о значительной утечке тяговых токов из рельсового пути и косвенно подтверждающих наличие влияния на подземные металлические сооружения. Однако, в некоторых случаях измерениями фиксировалось отсутствие такого влияния. Представительные данные, касающиеся распределения плотности тока на внешней поверхности обделки тоннелей и электрического поля блуждающих токов в окружающем грунте, практически отсутствуют. Имеющиеся теоретические разработки позволяют оценить только суммарное значение токов, протекающих в рельсах, в обделке и в земле, в зависимости от отвлеченных параметров схемы замещения.

На основе этих ограниченных по количеству и, можно сказать, противоречивых данных трудно установить какие-либо общие закономерности.

Необходима разработка теории распространения блуждающих токов подземного электрического рельсового транспорта с учетом всех конструктивных особенностей тоннелей, теории, с помощью которой можно было бы сопоставить и выяснить все накопленные до настоящего времени экспериментальные данные и целенаправленно разработать научно обоснованные мероприятия по защите от коррозии.

Настоящая диссертационная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию некоторых задач этой теории.

ГЛАВА I.

Электрическое поле постоянных токов в многослойной среде с цилиндрическими границами раздела.

Тоннели метрополитенов в большинстве случаев имеет цилиндрическую форму. Поэтому основные закономерности распространения блуждающих токов метрополитенов могут быть описаны как частный случай общих законов распределения электрического поля постоянных токов в многослойной среде с цилиндрическими границами раздела.

В однородном пространстве находится совокупность „m“ коаксиальных цилиндрических слоев с различными удельными электрическими сопротивлениями ρ_i . Каждая из „m“ границ раздела представляет собой тонкую пленку с поперечным сопротивлением R_i . Введем цилиндрическую систему координат, ось которой совпадает с осью симметрии. Пусть ϱ_i - внешний радиус i -того слоя, U_i - потенциал в i -ом слое. В среде, где расположены источники тока, потенциал представляется в виде двух слагаемых:

$$U = U_1 + U^*,$$

первое из которых соответствует нормальному полю источника; второе - искажению этого поля, вносимому электрическими неоднородностями среды. Функция U^* конечна и непрерывна во всем пространстве и уравнение Лапласа для неё справедливо для всей области применения.

Решение этого уравнения, полученное методом Фурье при условии периодичности по φ , имеет вид:

$$U_i^* = \int_0^{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} [A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi] [C_n \cos n\lambda z + D_n \sin n\lambda z] [E_n K_n(\lambda \varrho) + F_n I_n(\lambda \varrho)] d\lambda, \quad (1.1)$$

где $K_n(\lambda \varrho)$ и $I_n(\lambda \varrho)$ - цилиндрические функции от мнимого аргумента n - го порядка.

На поверхностях раздела $z = z_i$ обычные граничные условия непрерывности потенциала и нормальной составляющей плотности тока при наличии тонкой пленки с сопротивлением R_i трансформируются в следующие:

$$U_i - U_{i+1} = -\frac{R_i}{\rho_{i+1}} \frac{\partial U_{i+1}}{\partial z}; \quad \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial U_i}{\partial z} = \frac{1}{\rho_{i+1}} \frac{\partial U_{i+1}}{\partial z}. \quad (1.2)$$

Для точечных источников тока, находящихся на расстоянии d от центральной оси возможны три варианта размещения: а) во внутреннем цилиндре; б) в произвольном цилиндрическом слое; в) во внешней среде. Для этих вариантов потенциал в любом i -том слое определяется выражением:

$$U_i = \frac{\rho_i \rho_i I}{4\pi \sqrt{z^2 + d^2 - 2zd \cos \varphi + z^2}} + \sum_{n=0}^{\infty} [t_i M_i K_n(\lambda z) + s_i N_i I_n(\lambda z)] \cos n\varphi \cos \lambda z d\lambda; \quad (1.3)$$

$$t_i = \begin{cases} 0; & i=1; \\ 1; & i \neq 1; \end{cases} \quad s_i = \begin{cases} 0 & i=m+1; \\ 1 & i \neq m+1; \end{cases} \quad i=1, 2, 3, \dots, m+1.$$

$$\rho_i = \begin{cases} 1 & \text{а) } d \leq z_i \begin{matrix} i=1 \\ i \neq 1 \end{matrix}; \quad \text{б) } z_{k-1} \leq d \leq z_k \begin{matrix} i=k \\ i \neq k \end{matrix}; \quad \text{в) } d \geq z_m \begin{matrix} i=m+1 \\ i \neq m+1 \end{matrix}. \end{cases} \quad (1.4)$$

Постоянные M_i и N_i в (1.3) определяются из граничных условий (1.2). Для этого функцию источника

$$U_i = \frac{\rho_i \rho_i I}{4\pi \sqrt{z^2 + d^2 - 2zd \cos \varphi + z^2}}, \quad (1.5)$$

необходимо представить в виде разложения по цилиндрическим функциям $K_n(\lambda z)$ и $I_n(\lambda z)$. В работе на основе теории цилиндрических функций получено такое разложение:

$$U_{ii} = \begin{cases} \rho_i q_i \int_0^{\infty} \varepsilon_n K_n(\lambda z) I_n(\lambda d) \cos n\varphi \cos \lambda z d\lambda; & (z \geq d) \\ \rho_i q_i \int_0^{\infty} \varepsilon_n K_n(\lambda d) I_n(\lambda z) \cos n\varphi \cos \lambda z d\lambda; & (z \leq d) \end{cases} \quad (1.6)$$

$$q_i = \frac{\rho_i I}{2\pi^2}; \quad \varepsilon_n = \begin{cases} 1 & n=0 \\ 2 & n \neq 0 \end{cases}$$

Подставляя из (I.6) в (I.3) и реализуя граничные условия (I.2) на m поверхностях раздела для первого варианта размещения источника тока, находим:

$$\begin{aligned} & \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \left[(P_i q_i - P_{i+1} q_{i+1}) K_n(\lambda z_i) + \frac{\lambda R_i P_{i+1} q_{i+1}}{P_{i+1}} K'_n(\lambda z_i) \right] \varepsilon_n I_n(\lambda d) + (t_i M_i - t_{i+1} M_{i+1}) K_n(\lambda z_i) + \right. \\ & \left. + \frac{\lambda R_i t_{i+1} M_{i+1}}{P_{i+1}} K'_n(\lambda z_i) + (s_i N_i - s_{i+1} N_{i+1}) I_n(\lambda z_i) + \frac{\lambda R_i s_{i+1} N_{i+1}}{P_{i+1}} I'_n(\lambda z_i) \right\} \cos n\varphi \cos \lambda z d \lambda = 0; \\ & \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \left[\frac{P_i q_i}{P_i} - \frac{P_{i+1} q_{i+1}}{P_{i+1}} \right] \varepsilon_n K'_n(\lambda z_i) I_n(\lambda d) + \left[\frac{t_i M_i}{P_i} - \frac{t_{i+1} M_{i+1}}{P_{i+1}} \right] K'_n(\lambda z_i) + \right. \\ & \left. + \left[\frac{s_i N_i}{P_i} - \frac{s_{i+1} N_{i+1}}{P_{i+1}} \right] I'_n(\lambda z_i) \right\} \cos n\varphi \cos \lambda z d \lambda = 0; \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m) \end{aligned} \quad (I.7)$$

Граничные условия справедливы для любой точки цилиндрической поверхности, т. е. для любых z и φ . Для удовлетворения равенств (I.7) при любых z и φ необходимо и достаточно, чтобы выражения в фигурных скобках в (I.7) были тождественно равны нулю. Это условие дает систему $2m$ линейных алгебраических уравнений, решения которой определяют искомые коэффициенты и, следовательно, потенциальные функции V_i .

Аналогичным образом находятся коэффициенты M_i и N_i для второго и третьего вариантов расположения точечного источника тока.

Глава II. Функции влияния в неограниченном пространстве.

Введено понятие о единичных функциях влияния $h, \theta, \lambda, \mu, \gamma$ и ξ . Функции h, μ описывают распределение плотности тока на внешней поверхности подземного сооружения (тоннель, трубопровод, кабель), возбужденной точечным источником тока, когда он нахо-

дятся либо внутри стенки сооружения, либо во внешней среде. Функции θ и γ описывают электрическое поле в стенке сооружения; функции χ и ξ - во внешней среде при аналогичных вариантах размещения источника тока. Эти функции будут использованы в дальнейшем для решения основных задач. Они также имеют самостоятельное значение. Например, если не учитывать размеры узла присоединения проводников к сооружению и размеры анодного заземления, то h представляет собой решение прямой задачи электрозащиты сооружений; μ - решение задачи о влиянии анодного заземления.

Дан анализ существующих методов решения этих задач. Показано, что существующие методы уже в постановке задач являются приближенными.

На основе метода, изложенного в главе I, построены более точные соотношения для функций влияния. Подземное сооружение аппроксимировано цилиндрической структурой с двумя границами раздела $z = z_1$, $z = z_2$, на каждой из которых находится слой изоляционного покрытия с сопротивлением R'_u и R'_d . Цилиндрический слой между границами представляет стенку сооружения с удельным электрическим сопротивлением материала ρ_r . Осевой цилиндр - продукт, с удельным сопротивлением ρ_k , находящийся во внутренней полости; окружающее пространство - грунт с удельным сопротивлением ρ_c .

При любых значениях электрических и геометрических параметров сооружений функции влияния определяются в виде интегралов Фурье от бесконечной суммы дробно-линейной комбинации цилиндрических и алгебраических функций.

У большинства подземных сооружений толщина стенки значительно меньше радиуса поперечного сечения, а удельное электрическое сопротивление материала стенки значительно меньше удельного электрического сопротивления продукта во внутренней полости.

При выполнении этих условий формулы для функций влияния значительно упрощаются:

$$\eta = -\frac{IR_T z^2}{\pi} \int_0^\infty \sum_{n=0}^\infty \varepsilon_n \frac{K_n'(\lambda z)}{\Delta} \cos n\varphi \cos \lambda z \lambda d\lambda; \quad (2.1)$$

$$\chi = \frac{IR_T \rho_e z^2}{\pi} \int_0^\infty \sum_{n=0}^\infty \varepsilon_n \frac{K_n(\lambda z)}{\Delta} \cos n\varphi \cos \lambda z d\lambda; \quad (2.2)$$

$$\theta = \frac{IR_T z^2}{\pi} \int_0^\infty \sum_{n=0}^\infty \varepsilon_n \frac{\rho_e K_n(\lambda z) - \lambda R_u' K_n'(\lambda z)}{\Delta} \cos n\varphi \cos \lambda z d\lambda; \quad (2.3)$$

$$\mu = -\frac{I \rho_e}{2\pi^2 z} \int_0^\infty \sum_{n=0}^\infty \varepsilon_n \frac{(n^2 + \lambda^2 z^2) K_n(\lambda d)}{\Delta} \cos n\varphi \cos \lambda z d\lambda; \quad (2.4)$$

$$\xi = \frac{I \rho_e}{4\pi \sqrt{z^2 + d^2} 2ed \cos \varphi + z^2} - \frac{I \rho_e}{2\pi^2} \int_0^\infty \sum_{n=0}^\infty \varepsilon_n \left\{ [\rho_e I_n(\lambda z) - \lambda R_u' I_n'(\lambda z)] (n^2 + \lambda^2 z^2) - 2\pi \lambda z^3 R_T I_n'(\lambda z) \right\} \frac{K_n(\lambda d) K_n(\lambda z)}{\Delta} \cos n\varphi \cos \lambda z d\lambda; \quad (2.5)$$

$$\gamma = \frac{IR_T \rho_e z^2}{\pi} \int_0^\infty \sum_{n=0}^\infty \varepsilon_n \frac{K_n(\lambda d)}{\Delta} \cos n\varphi \cos \lambda z d\lambda; \quad (2.6)$$

$$\Delta = [\rho_e K_n(\lambda z) - \lambda R_u' K_n'(\lambda z)] (n^2 + \lambda^2 z^2) - 2\pi \lambda z^3 R_T K_n'(\lambda z),$$

где R_T - электрическое сопротивление единицы длины сооружения.

Из формул (2.1-6) следует, что функции влияния не зависят от ρ_e и утечка тока во внутреннюю полость не оказывает влияния на распределение плотности тока на поверхности сооружения и электрическое поле во внешней среде.

В большинстве случаев расстояния между сооружениями и источниками тока значительно больше диаметров сооружений. При этом условии функция источника вблизи поверхности сооружения может быть представлена в виде:

$$U_{ii} = \begin{cases} R_T \int_0^\infty \sum_{n=0}^\infty J_n K_n(\lambda d) I_n(\lambda z) \cos n\varphi \cos \lambda z d\lambda, & (z < d); \\ R_T \int_0^\infty \sum_{n=0}^\infty J_n K_n(\lambda z) I_n(\lambda d) \cos n\varphi \cos \lambda z d\lambda, & (z \geq d); \end{cases} \quad J_n = \begin{cases} 1 & n = 0. \\ 0 & n \neq 0. \end{cases}$$

Следовательно, при $d \gg z$, функции $\mu, \xi, \bar{\nu}$ будут описываться первым членом суммы в правой части равенств (2.4-6). Относительная ошибка определения функций может быть оценена по формуле:

$$\Delta = \left[1 - \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{1 + \bar{d}^2 + \bar{z}^2 - 2\bar{d}\cos\varphi}{(1 + \bar{d})^2 + \bar{z}^2}} \right] \cdot K \left(\sqrt{\frac{4\bar{d}}{(1 + \bar{d})^2 + \bar{z}^2}} \right) 100, \quad \bar{z} = \frac{z}{2}, \quad \bar{d} = \frac{d}{2}.$$

Наибольшее значение ошибки (Δ_{\max}) имеет место при $z = 0$ и $\varphi = 0$. Функция $\Delta_{\max} = f(\bar{d})$ монотонно-убывающая; уже при $\bar{d} > 20$, $\Delta_{\max} < 5\%$. Таким образом, если расстояние между источником тока и сооружением превышает десятикратный диаметр последнего, то можно считать, что функции $\mu, \xi, \bar{\nu}$ не зависят от φ . Аналогичный результат для функций η, χ, θ можно получить, учитывая, что удельное электрическое сопротивление материала стенки сооружения значительно меньше удельного электрического сопротивления продукта внутри сооружения и окружающего его грунта.

Глава III. Функции влияния в полупространстве. Конечная глубина залегания сооружений и источников тока.

При наличии границы раздела "проводящая земля-воздух" задача методом зеркальных отражений сводится к определению искомых функций для двух параллельных сооружений с одинаковыми параметрами, расположенных на расстоянии двойной глубины ($2H$) залегания друг от друга.

Рассматривая поверхность одного из сооружений как поверхность, на которой распределены фиктивные источники тока с плотностью, равной искомой плотности тока h_n (точечный источник тока подключён к стенке сооружения в точке $z = 0$ $\varphi = \varphi_0$), получим, что в общем виде последняя удовлетворяет интегральному уравнению:

$$h_n(z, \varphi) = h(z, \varphi) + 2i \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} h_n(a, \gamma) \mu(z-a, \varphi-\alpha) \Big|_{d=d_0} da d\gamma \quad (3.1)$$

В уравнении (3.1) $\mu(z-a, \varphi-\alpha) \Big|_{d=d_0}$ - функция, определяемая выражением (2.4) при $I=1$, в котором z и φ заменяются разностями $z-a$ и $\varphi-\alpha$, а угол α и расстояние d_0 заданы равенствами

$$d_0 = \sqrt{z^2 + 4H^2 - 4H\epsilon \cos \gamma}; \quad \sin \alpha = \frac{B_1}{d_0} \sin \gamma.$$

Решение (3.1) находится преобразованием Фурье и методом разделения переменных. Отдельные квадратуры вычисляются с помощью теоремы сложения цилиндрических функций:

$$h_n(z, \varphi) = -\frac{iR_1 \epsilon_1}{\pi} \int_0^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} [P \cos n\varphi + Q \sin n\varphi] \epsilon_n K'_n(\lambda \epsilon_1) \cos \lambda z d\lambda;$$

$$P = \frac{\cos n\varphi_0}{F_{n\lambda} + \frac{1}{2} \epsilon_n \rho_c I_n(\lambda \epsilon_2) [K_{2n}(2\lambda H) + K_0(2\lambda H)] \left(1 + \frac{n^2}{\lambda^2 \epsilon_1^2}\right) \lambda \epsilon_1};$$

$$Q = \frac{\sin n\varphi_0}{F_{n\lambda} + \frac{1}{2} \epsilon_n \rho_c I_n(\lambda \epsilon_2) [K_{2n}(2\lambda H) - K_0(2\lambda H)] \left(1 + \frac{n^2}{\lambda^2 \epsilon_1^2}\right) \lambda \epsilon_1};$$

$$F_{n\lambda} = [\rho_c K_n(\lambda \epsilon_2) - \lambda \rho'_c K'_n(\lambda \epsilon_2)] \left(1 + \frac{n^2}{\lambda^2 \epsilon_1^2}\right) \lambda \epsilon_1 - 2\pi \epsilon_2^2 R_r K'_r(\lambda \epsilon_2).$$

При условии эквипотенциальности сооружения по периметру поперечного сечения первое слагаемое в уравнении (3.1) не зависит от φ и будет определяться первым членом ряда в формуле (2.1). В этом случае решение (3.1) принимает вид:

$$h_n(z, \varphi) = \frac{iR_1 \epsilon_1}{\pi} \int_0^{\infty} \left\{ 1 - \sum_{n=0}^{\infty} P_n \cos n\varphi \right\} \frac{K_r(\lambda \epsilon_2) \cos \lambda z d\lambda}{[\rho_c K_r(\lambda \epsilon_2) + \lambda \rho'_c K'_r(\lambda \epsilon_2)] \lambda \epsilon_2 + 2\pi \epsilon_2^2 R_r K'_r(\lambda \epsilon_2)}; \quad (3.2)$$

$$P_{n\lambda} = \frac{\varepsilon_n \rho_c \lambda z_i \left(1 + \frac{n^2}{\lambda^2 z_i^2}\right) I_0(\lambda z_i) K_n(2\lambda H)}{F_{n\lambda} + \frac{1}{2} \varepsilon_n \rho_c I_n(\lambda z_i) [K_{2n}(2\lambda H) + K_0(2\lambda H)] \left(1 + \frac{n^2}{\lambda^2 z_i^2}\right) \lambda z_i}$$

Таким образом, даже при условии эквипотенциальности сооружения по периметру поперечного сечения плотность тока по периметру сечения распределяется неравномерно вследствие влияния конечной глубины залегания. Наибольшее значение имеет место в нижней части. ($\varphi = \pi$), наименьшее - по верхней образующей ($\varphi = 0$).

Для характеристики неравномерности введено понятие коэффициента неравномерности K_n :

$$K_n = \frac{h_n(\varphi = \pi)}{h_n(\varphi = 0)}.$$

Показано, что с большой точностью K_n может быть вычислен по формуле:

$$K_n = \frac{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} R_n (-1)^{n+1}}{1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} R_n}; \quad R_n = \left\{ \left(\frac{2Hn}{z_i} \right) \left(1 + n \frac{R'_u}{\rho_c z_i} \right) + \frac{(2n-1)!}{n!(n-1)!} \left(\frac{2H}{z_i} \right)^{n-1} \right\} \quad (3.3)$$

Из (3.3) следует, что неравномерность распределения плотности тока зависит от двух параметров: отношения глубины залегания к радиусу сооружения и отношения сопротивления изоляции к удельному электрическому сопротивлению грунта. Наибольшая неравномерность имеет место тогда, когда сооружение без изоляции верхней образующей касается дневной поверхности ($K_n \rightarrow \infty$). С увеличением отношений $\frac{H}{z_i} = \frac{R'_u}{\rho_c z_i}$ коэффициент K_n быстро уменьшается, приближаясь к единице. Если $\frac{H}{z_i} = \frac{R'_u}{\rho_c z_i}$ удовлетворяет неравенству

$$\frac{H}{z_i} \left(1 + \frac{R'_u}{\rho_c z_i} \right) \geq 20, \quad (3.4)$$

то относительные отклонения плотности тока, обусловленные влиянием границы раздела, от плотности тока при отсутствии таковой, не превышают 5%. При выполнении этого условия можно считать, что влияние границы пренебрежимо мало и $h_n = h$, $\theta_n = \theta$; $\mu_n = \mu$, $\gamma_n = \gamma$.

Влияние блуждающих токов на коррозионное состояние подземных сооружений обычно оценивается по результатам измерений разности потенциалов "сооружение-близкая земля" ΔU_{c-z} . Измерения выполняются, подключаясь к сооружению в верхней его части и устанавливая электрод сравнения непосредственно над ним. Такая методика измерений для сооружений больших диаметров с плохим состоянием изоляции, залегающих неглубоко от дневной поверхности, приводит к существенным ошибкам в оценке коррозионного состояния, поскольку измеряется минимальное значение ΔU_{c-z} .

Для исключения таких ошибок предлагается вводить поправку в результаты измерений ΔU_{c-z} по формуле:

$$\Delta U_{\text{факт.}} = K_n \Delta U_{\text{изм.}}$$

где K_n определяется по номограмме, исходя из заданных параметров R'_u , ρ_c , z , и H .

Глава IV. Распределение блуждающих токов, вызванных одиночной сосредоточенной токовой нагрузкой на рельсах подземной электрической железной дороги.

Для обделок тоннелей и смежных подземных сооружений на основе заложеного в предыдущих разделах принято, что имеет место условие эквипотенциальности по периметру и радиусу поперечного сечения, а влиянием границы раздела можно пренебречь. Поэтому, не рассматривая распределение потенциалов и токов в путевом бетоне, балласте и рельсах, как в объемных проводниках, представляется возможным заменить путевой бетон и балласт некоторым сопротивлением утечки R_u между рельсами и обделкой, а рельсовый путь аппроксимировать линейным проводником с утечкой R_u и продолженным сопротивлением R_p .

Параметры и функции влияния для обделки тоннеля обозначаются индексом "т", для подземного сооружения вводится индекс "с"

Обозначим через $V_p(z)$ и $V_r(z)$ — потенциалы обделки тоннеля и рельсового пути. Функция $\frac{1}{R_y} [V_p(z) - V_r(z)]$ характеризует распределение линейной плотности тока, стекающего с рельса на обделку.

В соответствии с принципом наложения потенциал обделки и плотность тока на ее внешней поверхности удовлетворяют равенствам:

$$V_p(z) = \frac{1}{R_y} \int_{-\infty}^{\infty} [V_p(a) - V_r(a)] h_r(z-a) da; \quad V_r(z) = \frac{1}{R_y} \int_{-\infty}^{\infty} [V_p(a) - V_r(a)] h_r(z-a) da. \quad (4.1-2)$$

Потенциал $V_p(z)$ рельса и ток в рельсах $i_p(z)$ подчиняются уравнениям:

$$i_p'(z) = -\frac{1}{R_y} [V_p(z) - V_r(z)]; \quad V_p'(z) = -R_p i_p(z). \quad (4.3-4)$$

Равенства (4.2-4) представляют собой систему интегро-дифференциальных уравнений относительно функций $V_p(z)$, $i_p(z)$, $V_r(z)$, решая которую с помощью теорем преобразований Фурье, находим:

$$V_p(z) = \frac{I_n R_p h_r z_1}{2\alpha} e^{-\alpha|z|} + \frac{\alpha^2 I_n R_p R_r z_1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{R_c K_0(\lambda z) + \lambda R'_u K_1(\lambda z)}{\lambda (\lambda^2 + \alpha^2) S_\lambda} \cos \lambda z d\lambda; \quad (4.5)$$

$$V_r(z) = \frac{I_n R_p h_r z_1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{R_c K_0(\lambda z) + \lambda R'_u K_1(\lambda z)}{\lambda S_\lambda} \cos \lambda z d\lambda; \quad (4.6)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_p}{R_y}}; \quad S_\lambda = [R_c K_0(\lambda z) + \lambda R'_u K_1(\lambda z)] [R_r + (\lambda^2 + \alpha^2) R_y] \lambda z_1 + 2\pi z_1^2 R_r (\lambda^2 + \alpha^2) K_1(\lambda z). \quad (4.7)$$

Функция, описывающая электрическое поле во внешней среде, строится аналогично функции плотности тока.

Смешанное подземное сооружение с параметрами z_c, R'_{uc}, R_c , как электрическая неоднородность искажает электрическое поле блуждающих токов и в том числе распределение плотности тока на обделке тоннеля. Для сооружения, лежащего на горизонтальном расстоянии l от него и глубине h , плотности тока $j_{ст}$ на сооружении и $j_{от}$ на обделке в присутствии сооружения определяются из системы

интегральных уравнений :

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{J}_{\pi}(z) &= \mathcal{J}_T(z) + 2\pi e_r \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{J}_{cr}(a) [\mu_r(z-a)|_{d=d'} + \mu_r(z-a)|_{d=d''}] da; \\ \mathcal{J}_{cr}(z) &= 2\pi e_r \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{J}_{\pi}(a) [\mu_c(z-a)|_{d=d'} + \mu_c(z-a)|_{d=d''}] da. \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

$d', d'' = \sqrt{(H \pm h)^2 + z^2}$

Из (4.8) при $d' \gg z_r$ и $d'' \gg z_c$ следует:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{J}_{\pi}(z) &= \mathcal{J}_T(z) = \frac{I_{\mu} R_p R_r z}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{K_0(\lambda z)}{S_{\lambda}} \cos \lambda z d\lambda; \\ \mathcal{J}_{cr}(z) &= -\frac{I_{\mu} R_p R_r R_c z}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{K_0(\lambda z) [K_0(\lambda d') + K_0(\lambda d'')] \cos \lambda z}{[R_c K_0(\lambda z) + \lambda R_{\mu c} K_0(\lambda z)] \lambda z_c + 2\pi e_r^2 R_c K_0(\lambda z)} \cdot \frac{\lambda d\lambda}{S_{\lambda}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Формулы (4.5-7, 4.9) в пределах принятых допущений дают точное решение задачи, но для инженерных расчетов использовать их практически невозможно. Если ограничить точность расчета 10-15 % и принять во внимание, что: 1) значение потенциала реле на единице длины значительно больше значений потенциала обделки; 2) погрешность численного определения интегралов не превышает 10%, если функцию $K_0(x)$ заменить ее первым приближением x^{-1} , а выражения

$\frac{R_c}{2\pi} K_0(\lambda z) + \frac{R_{\mu}}{2\pi e_r}$ заменить постоянной $R_{\pi T}$, которая есть корень уравнения:

$$R_{\pi T} = \frac{R_c}{2\pi} K_0\left(z_r \sqrt{\frac{R_r}{R_{\pi T}}}\right) + \frac{R_{\mu}}{2\pi e_r},$$

то формулы принимают вид, удобный для вычислений

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{U}_p(z) &= \frac{I_{\mu} R_p}{2\alpha} e^{-\alpha|z|}; \quad \mathcal{I}_p(z) = \frac{I_{\mu}}{2} e^{-\alpha|z|}; \\ \mathcal{U}_T(z) &= \frac{I_{\mu} R_{\pi T}}{2} \frac{\alpha \beta}{\alpha^2 - \beta^2} (\alpha e^{-\beta|z|} - \beta e^{-\alpha|z|}); \quad \mathcal{J}_T(z) = \frac{I_{\mu} \alpha \beta}{4\pi e_r (\alpha^2 - \beta^2)} (\alpha e^{-\beta|z|} - \beta e^{-\alpha|z|}); \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

$$\mathcal{J}_{cr}(z) = \mathcal{J}_c(z) = -\frac{I_{\mu} \alpha^2 \beta^2 z}{8\pi^2 z_c R_{\pi c}} \sum_{k=1}^3 \frac{\delta_k [\Omega(\delta_k z, \delta_k d') + \Omega(\delta_k z, \delta_k d'')]}{(\delta_{k+1}^2 - \delta_k^2)(\delta_k^2 - \delta_{k+2}^2)},$$

$$\delta_1 = \delta_4 = \alpha; \quad \delta_2 = \delta_5 = \beta = \sqrt{\frac{R_r}{R_{\pi T}}}; \quad \delta_3 = \gamma = \sqrt{\frac{R_c}{R_{\pi c}}},$$

где $\Omega(x, y)$ - специальные табулированные функции.

Точность определения 10-15 % достаточна для правильной оценки коррозионного состояния сооружения и уверенной разработки

средств защиты. Большая точность практически нецелесообразна, поскольку погрешность экспериментального определения параметров превосходит 15-20%.

Анализ приближенных формул показывает, что они описывают теокораспределение, возбужденное одиночной сосредоточенной токовой нагрузкой в электрической схеме, представляющей собой три связанные линии с распределенными постоянными, если выполняются условия: 1) продольные сопротивления линий I и II равны соответственно продольным сопротивлениям рельсового пути и обделки; 2) продольное сопротивление линии III равно нулю; 3) сопротивление утечке тока к лду линиями I и II равно сопротивлению утечки тока между рельсами и обделкой; 4) сопротивление утечке тока между линиями II и III определяется из уравнения:

$$R_{II-III} = \frac{R_r}{2\pi} K_0 \left(2\sqrt{\frac{R_r}{R_{I-II}}} \right) + \frac{R_{II}}{2\pi R_r} \quad (4.11)$$

Таким образом, приближенные решения в случае длинного тоннеля и одиночной токовой нагрузки могут быть получены в результате анализа токораспределения в простой трехлинейной схеме с распределенными постоянными. Этот вывод оправдался и для иных конструкций тоннелей и другого размещения токовых нагрузок, если они могут быть заданы граничными условиями.

В общем случае распределение потенциалов и токов в эквивалентной схеме описывается уравнениями:

$$\Delta U_{pr}(z) = A e^{-\alpha z} + B e^{\alpha z}; \quad L_p(z) = \frac{\alpha}{R_p} (A e^{-\alpha z} - B e^{\alpha z}); \quad (4.12)$$

$$U_r(z) = -\frac{R_r}{R_g(\alpha^2 - \beta^2)} \Delta U_{pr}(z) + C e^{-\beta z} + D e^{\beta z}; \quad I_r(z) = -\frac{\beta^2}{\alpha^2 - \beta^2} L_p(z) + \frac{\beta}{R_r} C e^{-\beta z} - \frac{\beta}{R_r} D e^{\beta z}$$

Постоянные A, B, C и D находятся из граничных условий, которые определяются конкретной конструкцией тоннеля и заданным распределением токовых нагрузок на рельсах. Плотность тока на обделке тоннеля (линейная) определяется соотношением:

$$\mathcal{I}_{\pi}(z) = \frac{1}{R_{\pi r}} \mathcal{I}_r(z). \quad (4.12)$$

По известному распределению плотностей тока на рельсах и обделке легко находятся электрическое поле в окружающем грунте и возбужденная им плотность тока на смежном (параллельном обделке) сооружении:

$$V_d = \frac{\beta^2 R_c}{2\pi^2} \int_0^\infty \frac{K_0(\lambda e) + K_0(\lambda \sqrt{z^2 + 4H^2 - 4H^2 \cos \psi})}{\lambda^2 + \beta^2} \int_L \mathcal{I}_p(a) \cos \lambda(z-a) da d\lambda; \quad (4.14)$$

$$\mathcal{I}_c = -\frac{R_c}{2\pi^2 R_{\alpha}} \int_0^\infty \frac{K_0(\lambda d') + K_0(\lambda d'')}{\lambda^2 + \gamma^2} \int_L \mathcal{I}_r(a) \cos \lambda(z-a) da d\lambda; \quad (4.15)$$

Поскольку $\mathcal{I}_p(z)$ и $\mathcal{I}_r(z)$ согласно (4.12) выражаются экспоненциальными функциями, интегралы в (4.14-15) вычисляются без затруднений.

Глава V. Закономерности распространения блуждающих токов в некоторых случаях распределения нагрузок на рельсах и конструкций тоннелей.

В настоящей главе методом эквивалентной схемы устанавливаются соотношения, описывающие основные закономерности распространения блуждающих токов, выясняются особенности их распределения по сравнению с блуждающими токами наземного рельсового электрического транспорта, анализируется влияние отдельных параметров и дается сравнительная оценка влияния блуждающих токов метрополитенов на коррозионное состояние подземных металлических сооружений, включая обделку тоннеля.

Рассмотрены варианты: 1) Большая длина тоннеля и большие интервалы между поездами. Раздельное питание контактной сети. 2) Большая длина тоннеля и конечный интервал между поездами. Раздельное и параллельное питание контактной сети. 3) Конечная длина тоннеля. Питание контактной сети от одной тяговой подстанции. Большие и конечные интервалы между поездами.

Для каждого варианта построены формулы, описывающие распреде-

ление мгновенных и средних значений плотности тока на внешней поверхности оболочки тоннеля, мгновенный и средний потоки блуждающих токов в земле, электрическое поле вблизи поверхности земли и возбуждаемый им разность потенциалов "сооружение-ближняя земля" на смежном подземном металлическом сооружении.

Например, в простейшем первом варианте, когда задача сводится к характеристике блуждающих токов, возбуждаемых двумя сосредоточенными токовыми нагрузками, одна из которых отрицательна и неподвижна (тяговая подстанция), а другая — положительная и перемещающаяся (электропоз), формула для мгновенной плотности тока имеет вид:

$$j_r(z) = \frac{I_a}{2} \frac{\alpha \beta}{\alpha^2 - \beta^2} [\alpha (e^{\beta|z-4|} - e^{\beta|z|}) - \beta (e^{-\alpha|z-4|} - e^{-\alpha|z|})].$$

Анализ соотношений, описывающих распространение блуждающих токов в рассмотренных вариантах показал, что в отличие от наземного электрического рельсового транспорта, распределение блуждающих токов метрополитенов определяется дополнительным параметром β , который характеризует электрические свойства оболочки тоннеля. На основе численных расчетов установлено, что для значений β , соответствующих сплошной металлической оболочке тоннелей, утечка тока в грунт, интенсивность блуждающих токов на 2-3 порядка меньше, чем у наземного электрического рельсового транспорта. Блуждающие токи таких метрополитенов практически не оказывают влияния на коррозионное состояние смежных сооружений. Это объясняется тем, что значительная часть тока, стекающего с рельса, не попадает в грунт, замыкаясь в хорошо проводящей оболочке тоннеля.

С увеличением β плотность тока, стекающего в грунт с оболочки, интенсивность электрического поля блуждающих токов и его влияние на смежные сооружения резко возрастает, приближаясь к значениям, характерным для наземного электрического транспорта. Для $\beta = 0,5 \frac{1}{\text{км}}$ они уже составляют около 50% этих значений. Расчет-

ты показали, что $\beta \geq 0,5 \frac{1}{\text{км}}$ характеризует электрические свойства обделки, у которой отдельные участки общей длиной до 30% выполнены из бетона или железобетона и зашунтированы металлическими проводниками с сечением 5000 мм² по стали. У метрополитенов с тоннелями подобной конструкции влияние блуждающих токов на смежные сооружения определяется расположением сооружений, их электрическими параметрами, состоянием рельсового пути и размещением токовых нагрузок на нем.

Распределение плотности тока по длине обделки существенно отличается от таковой на рельсах. Экстремумы смещены относительно точек приложения токовых нагрузок на рельсах. Смещение тем больше, чем меньше величина β . Это приводит к тому, что на обделках тоннелей конечной длины наибольшие значения плотности тока имеют место на участках вблизи концов тоннеля при любом размещении нагрузок на рельсах. Из данных расчетов по формулам настоящей главы следует, что даже для наихудших условий размещения токовых нагрузок на рельсах при плотности их до 1000 а/км наибольшая плотность тока в анодной зоне на внешней поверхности обделки составляет сотые доли миллиампера на квадратный дециметр. В реальных условиях, как показано в следующей главе, плотность тока значительно меньше этой величины. Такая анодная плотность тока не вызывает сколько-нибудь заметной коррозии чугуна.

Таким образом, блуждающие токи метрополитенов не представляют опасности для обделки тоннелей, выполненной из чугунных трубного.

Глава VI. Результаты экспериментальной проверки теоретических расчетов.

Экспериментальная проверка расчетных соотношений, установленных в предыдущих главах, проводилась в 1964 г. во время выполнения изыскательских работ по обследованию коррозионного состояния

подземных металлических сооружений Киевского метрополитена по следующей методике.

При определенном положении двух сосредоточенных нагрузок на рельсах регистрировалось распределение мгновенных значений разности потенциалов "рельс-тюбинг" $\Delta U_{рт}$ по всей длине тоннеля. По графику $\Delta U_{рт}$ определялись коэффициент α и продольное сопротивление рельсового пути R_p . Затем по формулам типа первых равенств (4.12) для тоннелей конечной длины рассчитывалось теоретическое значение $\Delta U_{рт}$ при других положениях нагрузок на рельсах, которые сопоставлялись с измеренными при этих же положениях нагрузок.

Измерение мгновенных значений $\Delta U_{рт}$ производилось в ночное время, когда по трассе метрополитена перемещался один поезд, питаемый от одной тяговой подстанции. Потребление тока поездом происходило на каждой станции на участке трогания и разгона. Регистрация потребления тока выполнялась регистрирующими амперметрами в цепи отсасывающих фидеров. Запись разности потенциалов $\Delta U_{рт}$ осуществлялась регистрирующими вольтметрами, установленными у входных световых фар каждой станции. На графиках изменения $\Delta U_{рт}$ и тока во времени выделялись синхронные значения. Наиболее характерной и четко определяемой точкой на всех графиках являлась точка, соответствующая моменту времени перед выключением тяговых двигателей, так как в этот момент значения тягового тока и $\Delta U_{рт}$ наиболее установившиеся во времени и отсчеты с лент выполняются с наибольшей точностью.

Сопоставление экспериментальных данных с расчетными показало, что среднее отклонение между ними не превышает 10% измеренных значений, а максимальное отклонение составляет 18,7%. Таким образом, приближенные формулы для $\Delta U_{рт}$ типа (4.12) с достаточной точностью описывают распределение $\Delta U_{рт}$ в тоннелях и могут использоваться для инженерных расчетов.

Для измерения плотности тока на внешней поверхности обделки разработаны новые способ и устройство, поскольку известные либо обладают существенными недостатками и не дают представительных данных, либо не могут использоваться в условиях метрополитенов по конструктивным особенностям устройств, реализующих эти способы.

На основе теории, изложенной в главах I и II, установлено, что:

$$j_r(z) = \frac{1}{L\rho_c} \left(1 + \frac{h+0,5L}{2r}\right) \Delta V(z) = K \Delta V(z). \quad (6.1)$$

где $\Delta V(z)$ - разность потенциалов между электродами, расположенными в грунте по нормали к обделке на расстоянии L друг от друга; h - расстояние от ближайшего электрода к поверхности обделки тоннеля.

Для измерения ΔV и ρ_c в грунт через существующие отверстия в стенках чугунных твингов вводится специальный зонд с четырьмя электродами АМNB. Зонд представляет собой конический стержень из изоляционного материала с хвостовой цилиндрической частью, где расположена коммутационная панель. Крепление зонда к стенке твинга осуществляется в стандартной пробке. Кольцевые свинцовые электроды расположены на поверхности конической части зонда на расстоянии $L = 140$ мм, друг от друга. Расстояние h от ближайшего электрода до поверхности обделки равно 63 мм. Средние электроды MN используются для измерения разности потенциалов; крайние АВ используются как эмиссионные в обычной четырехэлектродной схеме измерения ρ_c , для которой $\rho_c = K_r R_{изм}$.

Геометрический коэффициент зонда K_r определен с учетом влияния проводящей обделки тоннеля:

$$K_r = 8\pi L \left[1 - \frac{L^2}{(L+2h)(L+h)} + \frac{L^2}{(5L+2h)(2L+h)} \right]. \quad (6.2)$$

Измерение $R_{изм}$ может быть выполнено приборами М С-0,8, АПЧ-1, ЭП-1. Для измерения ΔV применяются высокочувствительные милливольтметры с большим входным сопротивлением типа НЗ73, шкала ко-

торных градуируется по значениям коэффициента K в (6.1) в единицах плотности тока. Необходимая чувствительность измерительной цепи достигается применением компенсатора ЭДС поляризации электродов.

Измерения плотности тока с помощью зонда в условиях Киевского метрополитена были выполнены по методике, которая была принята при регистрации разности потенциалов между рельсами и обделкой. Зонды устанавливались вблизи путевых ящиков; измерительная аппаратура — на ближайших подстанциях. Регистрация ΔU производилась непрерывно в течение времени, за которое поезд перемещался от одного конца тоннеля к другому. По результатам измерений построены графики мгновенного распределения плотности тока для моментов, соответствующих положению поезда перед выключением двигателей. Для этих же положений поезда рассчитаны теоретические графики.

Из сопоставления результатов расчета и измерений следует:

1) Относительная разность между измеренными и расчетными значениями изменяется по пунктам измерения от 3,6 % до 88,0%, составляя в среднем 25,3%. 2) Несмотря на большое различие между результатами расчета и измерений в каждом пункте, где они сопоставляются, характер распределения расчетных и измеренных значений плотности тока вдоль трассы тоннеля аналогичен. В одном и другом случае наибольшие значения фиксируются на концах тоннеля; точки перехода графиков через нуль практически совпадают, т.е. определение разделения анодных и катодных зон на обделке расчетом или измерениями даст одинаковый результат.

Разность между измеренными и расчетными значениями можно рассматривать как некоторую ошибку определения плотности тока. Показано, что распределение этой ошибки с большой точностью совпадает с нормальным законом, а систематические погрешности отсут-

ствуют. Таким образом, результаты экспериментальной проверки свидетельствуют о достаточно полном учете факторов, определяющих закономерности распространения блуждающих токов метрополитенов, и правильном выборе методики приближенных расчетов и измерений.

Заключение

В заключение можно коротко отметить следующие результаты, полученные в настоящей работе.

1. Решена в общем виде задача об определении электрического поля постоянных токов в многослойной среде с цилиндрическими границами раздела. Полученные решения могут быть использованы в любой области, где исследуемое явление в коаксиальных цилиндрических неоднородностях подчиняется уравнению Лапласа и соответствующим граничным условиям (например, электроразведка методом сопротивлений, распределение тока в многослойных цилиндрических проводниках, электрозащита внутренних поверхностей трубопроводов и цилиндрических резервуаров).

2. Построены функции влияния, имеющие тесную связь с расчетом влияния блуждающих токов наземных и подземных электрических железных дорог на подземные металлические сооружения и расчетом электрозащиты этих сооружений. Функции влияния определены с учетом толщины стенок сооружений, электропроводности продукта внутри сооружений, конечной и сравнимой с диаметрами сооружений глубины залегания.

3. Исследовано в общем виде влияние этих параметров на распределение электрического поля и даны практические рекомендации для учета этого влияния при расчетах и натурных обследованиях коррозионных условий подземных металлических сооружений.

4. Даны решения основных задач теории блуждающих токов под-

земных электрических железных дорог: о распределении плотности блуждающих токов на внешней поверхности обделки тоннелей; о электрическом поле, формируемом блуждающими токами в окружающем тоннели грунте; о влиянии блуждающих токов на коррозионные условия смежных подземных металлических сооружений.

5. Получены приближенные формулы, дающие решения основных задач с погрешностью 10-15%. Эти формулы содержат детально табулированные функции и могут быть использованы для инженерных расчетов.

6. На основе анализа приближенных решений обоснованы принципы построения эквивалентной электрической схемы, распределение потенциалов и токов в которой достаточно точно отображает распределение потенциалов и токов в объемной системе гальванической бетон-обделка тоннеля-грунт. Разработана методика построения приближенных формул с помощью эквивалентной схемы.

7. Установлены расчетные соотношения, на основе которых сделан анализ и дана характеристика блуждающим токам подземных электрических железных дорог при некоторых вариантах конструкции тоннелей, системы энергоснабжения поездов и их расположения в тоннеле. Оценена опасность блуждающих токов метрополитенов для металлической обделки тоннелей и смежных подземных сооружений.

8. Дано теоретическое обоснование способа измерения плотности блуждающих токов на внешней поверхности металлической обделки тоннелей, разработаны конструкции измерительного зонда и методика измерений.

Отдельные разделы диссертационной работы докладывались на II и IV межвузовских научных конференциях по подземной коррозии в г. Баку и Киевской научно-технической конференции в 1967г.

Материалы диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. Электрическое поле постоянных токов в многослойной среде с цилиндрическими границами раздела. Труды АН УССР, геофизический сборник № 3(14), 1965 г.

2. Устройство для измерения плотности блуждающих токов на внешней поверхности обделки тоннелей. Авторское свидетельство № 176632, 1965 г.

3. Способ измерения плотности блуждающих токов на внешней поверхности обделки тоннелей. Авторское свидетельство № 179376, 1965 г.

4. Протекторная защита подземных сооружений в грунтах с высоким электрическим сопротивлением. "Защита металлов" № 5, 1965 г.

5. Установка для катодной защиты от коррозии оболочек подземных кабелей. Авторское свидетельство № 149483, 1962 г.

6. Применение протекторов при совместной защите подземных сооружений от коррозии. Сборник "Защита подземных газопроводов от коррозии", часть II. Ленинградский дом научно-технической пропаганды, 1965 г.

7. Безопасность совместной защиты силовых кабелей высокого напряжения с другими подземными сооружениями. Сборник "Газовое дело" № 12, ЦНИИТЭнефтегаз, 1964 г.

8. Электрокоррозия внутренних поверхностей трубопроводов, используемых как проводники электрического тока. Сборник "Газовое дело" № 1, ЦНИИТЭнефтегаз, 1965 г.

9. Проектирование и осуществление совместной защиты подземных металлических сооружений промышленных предприятий. Научно-технический сборник по защите от коррозии. Донецкий дом научно-технической пропаганды, 1963 г.

10. К вопросу об экономичной защите от коррозии оболочек

силовых кабелей. "Электрические станции" (в печати)

II. Выбор оптимальных размеров элементов анодного заземления для катодных станций. Сборник "Газовое дело", ЦНИИТнефтегаз, (в печати).