

## Электromagnetic field and parameters of underground pipelines with anticorrosive covering

V.K. Slyshalov, d-r техн. наук, Ю.В. Кандалов, канд. техн. наук

Рассмотрены математические модели электромагнитного поля трубопровода с защитным антикоррозионным покрытием, проложенного в проводящей среде. Предложена методика расчета электромагнитных параметров трубопровода при покрытиях двух типов: битумная обмазка и экструдированный полиэтилен – слой конечной толщины. Исследование выполнено для случая неограниченной среды и случая конечного заглубления трубопровода, т.е. с учетом влияния границы воздух–грунт.

*Ключевые слова:* трубопровод, электромагнитное поле, электромагнитные параметры, антикоррозионное покрытие, граница раздела, проводящая среда, частотная характеристика.

## Electromagnetic Field and Parameters of Underground Pipelines with Anticorrosive Covering

V.K. Slyshalov, Doctor of Engineering, Yu.V. Kandalov, Candidate of Engineering

The article is devoted to the mathematical models of electromagnetic field of the pipeline with the protective anticorrosive covering laid in the conducting earth. The authors develop the calculation procedure of electromagnetic parameters of the pipeline on the basis of two types of covering: asphalt coating and extruding polyethylene as a layer of a final thickness. The research is carried out for the unlimited environment and for a case of the final pipeline penetration, when the influence of air-ground border is accepted.

*Key words:* pipeline, electromagnetic field, electromagnetic parameters, anticorrosive covering, boundary line, conducting earth, frequency characteristics.

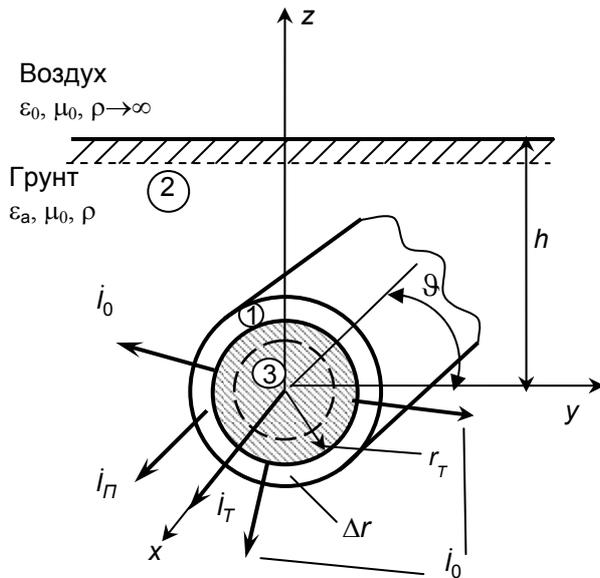
Трубопроводы нефти, нефтепродуктов и газа при их подземной прокладке защищают от коррозии путем нанесения битумных покрытий нормального, усиленного или весьма усиленного типа, сопротивления которых на единицу площади трубопровода находится в пределах от  $3 \cdot 10^5$  до  $11,5 \cdot 10^5$  Ом·м<sup>2</sup> [1]. Толщина этих слоев имеет порядок десятых долей миллиметра. В ходе эксплуатации изолирующие свойства такого покрытия существенно снижаются, что приводит к уменьшению сопротивления до  $10^2$ – $10^3$  Ом·м<sup>2</sup> [1]. Второй тип изоляционного покрытия, внедряемого в настоящее время, согласно ГОСТ51154–98 и ГОСТ9.602–2005, выполняется из экструдированного полиэтилена толщиной от 2,0 до 3,5 мм в зависимости от диаметра трубы ( $\varnothing$  до 720 мм) при удельном сопротивлении  $\rho = 10^{13}$ – $10^{15}$  Ом·м и относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon = 2,2$ – $2,4$  [2].

Антикоррозионное покрытие первого типа (битумную обмазку) имеют в ряде случаев и заземлители электроэнергетических объектов.

Наличие на поверхностях подземных трубопроводов высокоомных слабопроводящих покрытий препятствует стеканию в землю тока с трубопровода, т.е. ослабляет его заземляющие свойства в аварийных ситуациях (контакт с электрическими сетями или грозовые разряды). Следовательно, возрастает вероятность выноса зарядов и потенциалов из зоны контакта в отдаленные части трубопроводной системы, возникновения искровых разрядов, электрического пробоя и других явлений, инициирующих пожары и взрывы [3].

Ниже исследуется влияние антикоррозионного покрытия на электромагнитное поле в проводящей среде (грунте), окружающей трубопровод, и параметры, характеризующие процессы распространения поля вдоль трубопровода. Поскольку для стальных труб (удельное сопротивление  $\rho \cong 10^{-7}$  Ом·м, относительная магнитная проницаемость  $\mu \cong 200$ – $1000$ ) сравнительно большого радиуса  $r_T$  значение критерия  $r_T \sqrt{\omega \mu_0 \mu / \rho} > 10$ , эквивалентная глубина проникновения поля  $b < \Delta$ , где  $\Delta \cong 6$ – $10$  мм – толщина стены трубы, то в качестве объекта исследования допустимо использовать вместо трубы сплошной цилиндрический проводник того же диаметра. Замена не имеет принципиального значения, но за счет сокращения числа исследуемых областей поля позволяет несколько уменьшить объем вычислений. Постановку задачи поясняет рисунок.

Принимаем, что по трубопроводу протекает синусоидальный ток  $I_T$ ; ток в покрытии  $I_{\Gamma}$ ; суммарный ток  $I(x) = I_T(x) + I_{\Gamma}(x)$ ; амплитуды и фазы токов изменяются по длине трубопровода по закону  $i(x) = i(o) e^{-\gamma x}$ , где  $\gamma = \alpha + j\beta$  – постоянная распространения. Изменение тока  $i(x)$  по длине трубопровода обусловлено наличием радиального тока  $i_o(x) = -\frac{\partial I(x)}{\partial x} = \gamma i(x)$ , стекающего в грунт.



Координатная система и характеристики трубопровода и сред ( $\Delta r \ll r_T, h$ )

Процесс протекания тока в целом является волновым, и, как это следует из уравнений Максвелла [4], все составляющие комплексных напряженностей электромагнитного поля, а в данной задаче это  $E_{xi}(r, x)$ ,  $E_{ri}(r, x)$ ,  $H_{\vartheta i}(r, x)$ ,  $i = 1, 2, 3$  (см. рисунок), удовлетворяют уравнению Гельмгольца:

$$\Delta \psi_i + k_i^2 \psi_i = 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где  $\psi_i$  – любая из перечисленных выше компонент напряженностей в 1, 2, 3 областях поля (см. рисунок);

$$k_i^2 = \omega^2 \tilde{\epsilon}_{ai} \mu_{ai} = \omega^2 \left( \epsilon_{ai} - j \frac{1}{\omega \rho_i} \right) \mu_{ai}. \quad (2)$$

Искомое волновое электромагнитное поле представляем как сумму полей: первичного, создаваемого током  $i(x)$ , и вторичного, обусловленного границей раздела воздух – грунт. Методические основы такого подхода к решению разработаны в [5–8]. Уравнения первичного поля, учитывая, что  $\frac{\partial}{\partial x} = -\gamma$ , согласно [6] имеют следующий вид:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d \dot{E}_{xi}}{dr} \right) + m_i^2 \dot{E}_{xi} = 0; \quad (3)$$

$$\dot{E}_{ri} = \frac{1}{m_i^2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \dot{E}_{xi}}{\partial r} \right); \quad (4)$$

$$\dot{H}_{\vartheta i} = -j \frac{\omega \tilde{\epsilon}_{ai}}{m_i^2} \frac{\partial \dot{E}_{xi}}{\partial r},$$

где  $m_i^2 = k_i^2 + \gamma^2$ .

Под  $\dot{E}_{xi}(r, x)$  понимается комплексная амплитуда продольной составляющей напряженности  $\vec{E}_i$ , т.е.:

$$\dot{E}_{xi}(r, x) = E_{xi}(r, 0) e^{j\psi_E(r,0)} \cdot e^{-\gamma x}. \quad (5)$$

Общая форма решения уравнения (3) известна, поэтому, опуская промежуточные выкладки, записываем с учетом (4) выражения для  $\dot{E}_x$ ,  $\dot{E}_r$ ,  $\dot{H}_\vartheta$  в областях 1, 2, 3 (см. рисунок) при  $h \rightarrow \infty$  ( $h \gg r_T$ ):

1) область 1 –  $r_T \leq r \leq r'_T$ ;  $r'_T = r + \Delta r$  (покрытие):

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{x1} &= A_1 J_0(m_1 r) + B_1 H_0^{(1)}(m_1 r), \\ \dot{E}_{r1} &= \frac{1}{m_1} \frac{dA_1}{dx} J'_0(m_1 r) + \frac{1}{m_1} \frac{dB_1}{dx} H'_0(m_1 r), \\ \dot{H}_{\vartheta 1} &= -j \frac{\omega \tilde{\epsilon}_{a1}}{m_1} [A_1 J'_0(m_1 r) + B_1 H'_0(m_1 r)], \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$m_1 = (k_1^2 + \gamma^2)^{1/2},$$

$$k_1^2 = \omega^2 \tilde{\epsilon}_{a1} \mu_{a1},$$

$$\tilde{\epsilon}_{a1} = \epsilon_0 \epsilon_1 - j \frac{1}{\omega \rho_1};$$

2) область 2 –  $r'_T \leq r \leq \infty$  (грунт):

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{x2} &= C_2 H_0^{(1)}(m_2 r), \\ \dot{E}_{r2} &= \frac{1}{m_2} \frac{dC_2}{dx} H'_0(m_2 r), \\ \dot{H}_{\vartheta 2} &= -j \frac{\omega \tilde{\epsilon}_{a2}}{m_2} C_2 H'_0(m_2 r), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$m_2 = (k_2^2 + \gamma^2)^{1/2},$$

$$k_2 = \left( -j \frac{\omega \mu_0}{\rho_2} \right)^{1/2},$$

$$\tilde{\epsilon}_{a2} = \epsilon_0 \epsilon_1 - j \frac{1}{\omega \rho_2} \cong -j \frac{1}{\omega \rho_2};$$

3) область 3 –  $0 \leq r \leq r_T$  (проводник):

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{x3} &= D_3 J_0(k_3 r), \\ \dot{E}_{r3} &= \frac{1}{k_3} \frac{dD_3}{dx} J'_0(k_3 r), \\ \dot{H}_{\vartheta 3} &= -\frac{1}{k_3 \rho_3} D_3 J'_0(k_3 r), \end{aligned} \right\}$$

$$m_3 \cong k_3 = \left( -j \frac{\omega \mu_0 \mu}{\rho_3} \right)^{1/2}, \quad (8)$$

$$\tilde{\epsilon}_{a3} \cong -j \frac{1}{\omega \rho_3}.$$

В выражениях (6)–(8)  $J_0(\xi r)$ ,  $H_0(\xi r)$  – функции Бесселя и Ханкеля.

Условия однозначности для этих групп уравнений имеют следующий вид:

1) граница областей 1, 2 ( $r = r'_T$ )

$$\dot{E}_{x1}(r'_T) = \dot{E}_{x2}(r'_T); \quad \dot{H}_{\vartheta 1}(r'_T) = \dot{H}_{\vartheta 2}(r'_T); \quad (9)$$

2) граница областей 3, 1 ( $r = r'_T$ )

$$\dot{E}_{x3}(r_T) = \dot{E}_{x1}(r_T); \dot{H}_{93}(r_T) = \dot{H}_{91}(r_T). \quad (10)$$

Дополнительно из закона полного тока получаем равенство  $\dot{H}_{91}(r_T)2\pi r = \dot{i}_T$ , т.е., согласно (6), имеем

$$\dot{i}_T = -j \frac{\omega \tilde{\epsilon}_{a1}}{m_1} A_1 \left[ J'_0(m_1 r_T) + \frac{B_1}{A_1} H'_0(m_1 r_T) \right] 2\pi r_T. \quad (11)$$

При  $r = r'_T$  аналогичным образом находим

$$H_{91}(r'_T)2\pi r'_T = \dot{i}_T + \dot{i}_n = \dot{i},$$

$$\dot{i} = -j \frac{\omega \tilde{\epsilon}_{a1}}{m_1} A_1 \left[ J'_0(m_1 r'_T) + \frac{B_1}{A_1} H'_0(m_1 r'_T) \right] 2\pi r'_T. \quad (12)$$

Следовательно, отношение этих токов дает формула

$$\frac{\dot{i}_T}{\dot{i}} = \frac{r_T}{r'_T} \frac{J'_0(m_1 r_T) + \frac{B_1}{A_1} H'_0(m_1 r_T)}{J'_0(m_1 r'_T) + \frac{B_1}{A_1} H'_0(m_1 r'_T)}. \quad (13)$$

Расчет постоянных интегрирования выполняем следующим образом:

1) на поверхности заземлителя, т.е. при  $r = r_T$  имеем

$$2\pi r_T H_{93}(r_T) = -\frac{2\pi r_T}{k_3 \rho_3} J'_0(k_3 r_T) D_3 = \\ = \dot{i} \rightarrow D_3 = \frac{\dot{i}}{2\pi r_T} k_3 \rho_3 \frac{1}{J_1(k_3 r_T)};$$

2) по условию  $E_{x1}(r_T) = E_{x3}(r_T)$  получаем равенство

$$A_1 \left[ J_0(m_1 r_T) + \frac{B_1}{A_1} H_0^{(1)}(m_1 r_T) \right] = \\ = \frac{\dot{i}}{2\pi r_T} k_3 \rho_3 \frac{J_0(k_3 r_T)}{J'_1(k_3 r_T)},$$

из которого выражаем  $A_1$ :

$$A_1 = j \frac{k_3 \rho_3}{2\pi r_T} \frac{J_0(k_3 r_T)}{J'_1(k_3 r_T)} / \left[ J_0(m_1 r_T) + \frac{B_1}{A_1} H_0^{(1)}(m_1 r_T) \right];$$

3) из равенства токов  $\dot{i} \cong \dot{i} + \Delta \dot{i}_c \approx \dot{i}$  имеем  $H_{91}(r_T)2\pi r_T = \dot{i}$ ;  $H_{91}(r'_T)2\pi r'_T = \dot{i}$

$$\frac{B_1}{A_1} = \frac{\frac{\dot{i}_T}{r_T} J'_0(m_1 r'_T) - J'_0(m_1 r_T)}{H'_0(m_1 r_T) - \frac{\dot{i}_T}{r_T} H'_0(m_1 r'_T)}, \text{ из которого находим}$$

$A_1$ ;

4) из равенства  $E_{x1}(r'_T) = E_{x2}(r'_T)$  получаем уравнение

$A_1 \left[ J_0(m_1 r'_T) + \frac{B_1}{A_1} H_0^{(1)}(m_1 r'_T) \right] = C_2 H_0^{(1)}(m_2 r'_T)$ , из которого находим  $C_2$ ;

5) параметры  $m_1$  и  $m_2$  находим совместно с расчетом отношения  $\frac{A_1}{B_1}$  по (13), где следует

принять  $\frac{\dot{i}_T}{\dot{i}} = 1$ . Из условий на границах сред (9), (10) получаем

$$\frac{E_{x3}(r_T)}{H_{93}(r_T)} = \frac{E_{x1}(r_T)}{H_{91}(r_T)} \rightarrow \frac{J_0(k_3 r_T)}{-\frac{1}{k_3 \rho_3} J'_0(k_3 r_T)} = \\ = \frac{J_0(m_1 r_T) + \frac{B_1}{A_1} H_0^{(1)}(m_1 r_T)}{-j \frac{\omega \tilde{\epsilon}_{a1}}{m_1} \left[ J'_0(m_1 r_T) + \frac{B_1}{A_1} H'_0(m_1 r_T) \right]}; \quad (14)$$

$$\frac{E_{x1}(r'_T)}{H_{91}(r'_T)} = \frac{E_{x2}(r'_T)}{H_{92}(r'_T)} \rightarrow \frac{H_0^{(1)}(m_2 r'_T)}{-j \frac{\omega \tilde{\epsilon}_{a2}}{m_2} H'_0(m_2 r'_T)} = \\ = \frac{J_0(m_1 r'_T) + \frac{B_1}{A_1} H_0^{(1)}(m_1 r'_T)}{-j \frac{\omega \tilde{\epsilon}_{a1}}{m_1} \left[ J'_0(m_1 r'_T) + \frac{B_1}{A_1} H'_0(m_1 r'_T) \right]}. \quad (15)$$

При решении системы уравнений (13), (14), (15) могут быть найдены все характеристики первичного поля и, в частности, получены оценки влияния антикоррозионного покрытия на электромагнитный волновой процесс в трубопроводе в «чистом виде», т.е. без учета искажений, вносимых в него границей раздела грунт-воздух. Методику этих расчетов рассмотрим на примере газопровода из стальных труб  $\varnothing 273$  мм,  $\Delta = 6$  мм,  $\rho_3 = 10^{-7}$  Ом-м,  $\mu = 1000$ , проложенного в грунтах с  $\rho_2 = 10^2$  Ом-м и  $\rho_2 = 10^3$  Ом-м при толщине битумного покрытия  $\Delta r = 1$  мм. Частота тока  $f = 50$  Гц.

Электромагнитные параметры этой трубы

$$k_3 = \left( -j \frac{\omega \mu_0 \mu}{\rho_3} \right)^{1/2} = 1,986 \cdot 10^3 e^{-j45^\circ}, \text{ эквивалентная}$$

глубина проникновения  $b \cong 7 \cdot 10^{-4}$  м, комплексное сопротивление единицы длины

$$Z_0 = \frac{k_3 \rho_3}{2\pi r_T} \frac{J_0(k_3 r_T)}{J_1(k_3 r_T)} \approx 2,310 \cdot 10^{-4} e^{j45^\circ} \text{ Ом/м.}$$

Продольное сопротивление покрытия на единицу длины при постоянном токе, т.е. минимальное значение возможного сопротивления, равно

$$R_n = \rho_1 / 2\pi r_{cp} \times \Delta r \approx 10^8 \div 10^9 \text{ Ом/м.}$$

Из сравнения  $Z_0$  и  $R_n$  следует, что  $\dot{i} = \dot{i}_T + \dot{i}_n = \dot{i}_T$ , или  $\dot{i}_n \cong 0$ .

Таким образом, при  $\Delta r \ll r_T$  будут выполнены условия

$$E_{x1}(r'_T) \cong E_{x3}(r_T); H_{91}(r'_T) \cong H_{93}(r_T), \quad (16)$$

означающие, что для весьма тонкого покрытия допустимо при решении уравнений (14), (15)

принять  $r'_T = r_T$  и, поскольку в этом случае их правые части становятся тождественными, определять параметр  $m_2$  решая уравнение

$$\frac{H_0^{(1)}(m_2 r_T'')}{-j \frac{\omega \tilde{\epsilon}_{a2}}{m_2} H_0'(m_2 r_T'')} = \frac{J_0(k_3 r_T'')}{-\frac{1}{k_3 \rho_3} J_0'(k_3 r_T'')}, \quad (17)$$

где  $r_T''$  – некоторый эквивалентный радиус в интервале  $r_T \leq r_T'' \leq r_T' = r_T + \Delta r$ , например,  $r_T$ ,

$$r_T', r_{Tcp} = \frac{1}{2}(r_T + r_T'') \text{ и т.д.}$$

В преобразованном виде (17) имеет вид

$$\left(\frac{\gamma' m_2 r_T''}{2j}\right)^2 \ln\left(\frac{\gamma' m_2 r_T''}{2j}\right)^2 = \frac{\gamma'^2}{2} k_3 r_T'' \frac{\rho_3}{\rho_3} \frac{J_0(k_3 r_T'')}{J_1(k_3 r_T'')}, \quad \gamma' = 1,781 \quad (18)$$

и совпадает с соответствующим уравнением, записанным для скважинного заземлителя [9]. Решения (18) для двух вариантов значения радиуса  $r_T$  и  $r_T'$  при  $\rho_2 = 10^2$  Ом·м и  $\rho_2 = 10^3$  Ом·м дает табл. 1.

По найденному значению  $m_{2,0}$  определяются и другие параметры волнового процесса [9]:

– постоянная распространения

$$\gamma_0 = (m_{2,0} - k_2^2)^{1/2}; \quad (19)$$

– волновое сопротивление

$$Z_{\infty 0} = \frac{\gamma_0 Z_0}{m_{2,0}^2}; \quad (20)$$

– сопротивление, характеризующее утечку за счет тока  $i_0$ ,

$$Z_{\infty 0} = \frac{Z_{\infty 0}}{\gamma_0} = \frac{Z_0}{m_{2,0}^2} = \frac{\dot{U}(x, r_T')}{i_0(x)}. \quad (21)$$

Перечисленные параметры соответствуют трубопроводу без покрытия (индекс «0») и вычисляются при радиусе  $r_T$ . Для учета покрытия напряжения на трубопроводе  $\dot{U}(x, r_T)$

представляем в форме суммы  $\dot{U}(x, r_T) = \dot{U}(x, r_T') + \dot{U}_\Pi(x)$ . Соответственно, сопротивление утечки  $Z_\Pi$  получаем в виде

$$Z_\Pi = \frac{\dot{U}(x, r_T') + \dot{U}_\Pi(x)}{i_0(x)} = Z_{\infty 0} + R_\Pi, \quad R_\Pi = \frac{R_s}{2\pi r_T}, \quad (22)$$

где  $R_s = \rho_1 \Delta r$  – измеряемое сопротивление покрытия на единицу площади трубопровода,  $\dim R_s = \text{Ом} \cdot \text{м}^2$ .

По найденному значению  $Z_\Pi$  и формулам (21), (19), (20) определяем последовательно  $m_2$ ,  $\gamma$ ,  $Z_B$ . Полученные значения (при  $R_s = 10^2$  и  $10^3$  Ом·м<sup>2</sup>) и значения этих пара-

метров для трубопровода без покрытия приведены в табл. 2.

Это не единственный способ вычисления волновых параметров. Вычисления можно начать с определения

$$Z_{\infty 0} = \frac{\rho_2}{2\pi} \ln \frac{1,123j}{r_T' \sqrt{\frac{Z_0}{Z_{\infty 0}}}}, \quad (23)$$

выведенном в [9] и являющемся обобщением известной формула Зунде для постоянного тока [10].

Анализ результатов (табл. 2) показывает, что наличие даже весьма тонкого высокоомного покрытия приводит к заметному (~20 %) уменьшению коэффициента затухания  $\alpha$  и уменьшению скорости распространения  $V = \omega/\beta$  примерно в 2,3 раза ( $\omega = 314$ ).

Для оценки влияния высокоомного покрытия на поле и параметры границы раздела грунт–воздух воспользуемся той же методикой, но первую часть задачи, в которой определяются значения параметров  $m_{2,0}$ ,  $\gamma_0$ ,  $Z_{\infty 0}$ ,  $Z_{\infty 0}$ , решаем, используя уравнение [8]

$$\left(\frac{\gamma' m_{2,0} \sqrt{2hr_T}}{2j}\right)^2 \ln\left(\frac{\gamma' m_{2,0} \sqrt{2hr_T}}{2j}\right)^2 = \frac{\gamma'^2}{2} k_3 h \frac{\rho_3}{\rho_2} \frac{J_0(k_3 r_T)}{J_1(k_3 r_T)}; \quad \gamma' = 1,781. \quad (24)$$

Результаты расчета для заглубления  $h = 1,5$  м при удельных сопротивлениях грунта  $\rho_2 = 10^2$  Ом·м и  $\rho_3 = 10^3$  Ом·м представлены в табл. 3.

Принципиальное отличие задачи об электромагнитных параметрах трубопровода с полиэтиленовым покрытием от задачи, рассмотренной выше, заключается в том, что покрытие имеет конечные размеры, вследствие чего в методику расчета включается пункт определения характеристик изолирующего слоя. Поскольку толщина последнего, его удельное сопротивление и диэлектрическая проницаемость имеют вполне конкретные значения, поступаем следующим образом:

1. Используя очевидное равенство  $i = i_T$ , определяем при совместном решении уравнений (13) и (14) значения постоянных  $\frac{B_1}{A_1}$  и  $m_1$ .

2. Решая при найденных значениях  $\frac{B_1}{A_1}$ ,  $m_1$  уравнение (15), находим для грунта значение параметра  $m_{20}$  и по формулам (19), (20) и (21) определяем постоянную распространения  $\gamma_0$ , волновое сопротивление  $Z_{\infty 0}$  и переходное сопротивление  $Z_{\infty 0}$  (индексом «0», как и выше, помечены величины, не учитывающие поперечного сопротивления, вносимого покрытием).

Таблица 1. Значения электромагнитного параметра  $m_2$  для различных грунтов при толщине покрытия  $1 \cdot 10^{-3}$  м

$\rho_2$ , мм	$r_T$ , м	$m_{2,0}^2$ , 1/м	$r'_T$ , м	$m_{2,0}^2$ , 1/м
100	0,137	$1,637 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j36^\circ 814}$	$0,137+10^{-3}$	$1,627 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j36^\circ 81}$
1000	0,137	$1,441 \cdot 10^{-7} \cdot e^{j37^\circ 841}$	$0,137+10^{-3}$	$1,432 \cdot 10^{-7} \cdot e^{j37^\circ 838}$

Таблица 2. Значения электромагнитных параметров трубопровода с покрытиями ( $R_{s1} = 10^2$  Ом·м<sup>2</sup>,  $R_{s2} = 10^3$  Ом·м<sup>2</sup> в грунтах с  $\rho_2 = 10^2$  Ом·м,  $\rho_2 = 10^3$  Ом·м) и параметров трубопровода без покрытия (в тех же грунтах)

Трубопровод без покрытия $r_T = 0,137$ м, $\rho_3 = 10^{-7}$ Ом·м		Трубопровод с покрытием $r_T = 0,137$ м, $\rho_3 = 10^{-7}$ Ом·м	
$\rho_2 = 10^2$ Ом·м	$m_{2,0}^2 = 1,637 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j36^\circ 814}$ 1/м $\gamma_0 = 2,258 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j37^\circ 551}$ 1/м $Z_{B0} = 0,319 \cdot e^{j45^\circ 662}$ Ом $Z_{\Gamma 0} = 141,098 \cdot e^{j8^\circ 111}$ Ом·м	$R_{s1} = 10^2$ Ом·м <sup>2</sup>	$m_2^2 = 0,9 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j40^\circ 476}$ 1/м $\gamma = 2,141 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j40^\circ 702}$ 1/м $Z_B = 0,549 \cdot e^{j45^\circ 151}$ Ом $Z_{\Gamma} = 256,631 \cdot e^{j4^\circ 449}$ Ом·м
		$R_{s2} = 10^3$ Ом·м <sup>2</sup>	$m_2^2 = 0,178 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j44^\circ 049}$ 1/м $\gamma = 2,018 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j44^\circ 102}$ 1/м $Z_B = 2,626 \cdot e^{j44^\circ 978}$ Ом $Z_{\Gamma} = 1,302 \cdot 10^3 \cdot e^{j0^\circ 876}$ Ом·м
$\rho_2 = 10^3$ Ом·м	$m_{2,0}^2 = 1,441 \cdot 10^{-7} \cdot e^{j37^\circ 841}$ 1/м $\gamma_0 = 7,044 \cdot 10^{-4} \cdot e^{j38^\circ 37}$ 1/м $Z_{B0} = 1,129 \cdot e^{j45^\circ 454}$ Ом $Z_{\Gamma 0} = 500,028 \cdot e^{j7^\circ 903}$ Ом·м	$R_{s1} = 10^2$ Ом·м <sup>2</sup>	$m_2^2 = 0,376 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j38^\circ 51}$ 1/м $\gamma = 0,83 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j32^\circ 4469}$ 1/м $Z_B = 0,512 \cdot e^{j38^\circ 886}$ Ом $Z_{\Gamma} = 615,304 \cdot e^{j6^\circ 415}$ Ом·м
		$R_{s2} = 10^3$ Ом·м <sup>2</sup>	$m_2^2 = 0,139 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j42^\circ 549}$ 1/м $\gamma = 0,707 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j39^\circ 071}$ 1/м $Z_B = 1,172 \cdot e^{j41^\circ 447}$ Ом $Z_{\Gamma} = 1,658 \cdot 10^3 \cdot e^{j2^\circ 376}$ Ом·м

3. Влияние покрытия учтем, используя формулу (22)

$$Z_n = Z_{n0} + \frac{\dot{U}_n(x)}{i_0(x)},$$

где

$$\begin{aligned} \dot{U}_n(x) &= \dot{U}(r'_T) - \dot{U}(r_T) = \int_{r_T}^{r'_T} \dot{E}_n(r) dr = \\ &= \int_{r_T}^{r'_T} \frac{I_0(r)}{2\pi r} \left( \frac{1}{\rho_1} + j\omega \epsilon_0 \epsilon_1 \right)^{-1} dr = \\ &= \frac{I_0(x)}{2\pi} \left( \frac{1}{\rho_1} + j\omega \epsilon_0 \epsilon_1 \right)^{-1} \ln \frac{r'_T}{r_T}. \end{aligned}$$

Следовательно, в данном случае

$$Z_n = Z_{n0} + \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1}{\rho_1} + j\omega \epsilon_0 \epsilon_1 \right)^{-1} \ln \frac{r'_T}{r_T}. \quad (25)$$

4. В дальнейшем расчет выполняется по формулам (21), (19) и (20).

Полученные результаты соответствуют случаю  $h \rightarrow \infty$ . Для оценки влияния границы

раздела грунт-воздух и соответственной коррекции расчетного значения параметра  $m_{2,0}$  сравним результаты расчетов по определению значений параметров  $m_{2,0}$ ,  $\gamma_0$ ,  $Z_{B0}$ ,  $Z_{\Gamma 0}$ , являющихся характеристиками электромагнитного поля в грунте, т.е. за пределами покрытий.

Имеем:

– для поля за битумным покрытием

$$\begin{aligned} m_{2,0}^2 &= 1,637 \cdot 10^{-6} e^{j36,814^\circ}, \\ \gamma_0 &= 2,265 \cdot 10^{-3} e^{j37,35^\circ}, \quad Z_{B0} = 0,309 e^{j45,97^\circ}, \end{aligned}$$

$$Z_{\Gamma 0} = 136,4 e^{j8,62^\circ};$$

– для полиэтиленового покрытия

$$\begin{aligned} m_{2,0}^2 &= 1,647 \cdot 10^{-6} e^{j36,21^\circ}, \quad \gamma_0 = 2,258 \cdot 10^{-3} e^{j37,45^\circ}, \\ Z_{B0} &= 0,317 e^{j45,97^\circ}, \quad Z_{\Gamma 0} = 141 e^{j8,90^\circ}. \end{aligned}$$

Таблица 3. Значения электромагнитных параметров трубопровода с покрытиями ( $R_{s1} = 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ ,  $R_{s2} = 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$  в грунтах с  $\rho_2 = 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $\rho_2 = 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) и параметров трубопровода без покрытия (в тех же грунтах)

Трубопровод без покрытия $r_T = 0,137 \text{ м}$ , $\rho_3 = 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$		Трубопровод с покрытием $r_T = 0,137 \text{ м}$ , $\rho_3 = 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$	
$\rho_2 = 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $h = 1,5 \text{ м}$	$m_{2,0}^2 = 0,956 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j35^\circ 361} \text{ 1/м}$	$R_{s1} = 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$	$m_2^2 = 0,647 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j38^\circ 461} \text{ 1/м}$
	$\gamma_0 = 2,137 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j40^\circ 086} \text{ 1/м}$		$\gamma = 2,092 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j41^\circ 675} \text{ 1/м}$
	$Z_{B0} = 0,517 \cdot e^{j49^\circ 651} \text{ Ом}$		$Z_B = 0,747 \cdot e^{j48^\circ 139} \text{ Ом}$
	$Z_{\Gamma 0} = 241,808 \cdot e^{j9^\circ 564} \text{ Ом} \cdot \text{м}$		$Z_{\Gamma} = 356,887 \cdot e^{j6^\circ 464} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
$\rho_2 = 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $h = 1,5 \text{ м}$	$m_{2,0}^2 = 0,824 \cdot 10^{-7} \cdot e^{j36^\circ 764} \text{ 1/м}$	$R_{s1} = 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$	$m_2^2 = 0,233 \cdot 10^{-6} \cdot e^{j37^\circ 111} \text{ 1/м}$
	$\gamma_0 = 6,699 \cdot 10^{-4} \cdot e^{j40^\circ 769} \text{ 1/м}$		$\gamma = 7,524 \cdot 10^{-4} \cdot e^{j35^\circ 44} \text{ 1/м}$
	$Z_{B0} = 1,878 \cdot e^{j48^\circ 93} \text{ Ом}$		$Z_B = 0,748 \cdot e^{j43^\circ 254} \text{ Ом}$
	$Z_{\Gamma 0} = 878,753 \cdot e^{j8^\circ 844} \text{ Ом} \cdot \text{м}$		$Z_{\Gamma} = 993,704 \cdot e^{j7^\circ 814} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
		$R_{s2} = 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$	$m_2^2 = 1,136 \cdot 10^{-7} \cdot e^{j41^\circ 118} \text{ 1/м}$
			$\gamma = 6,907 \cdot 10^{-4} \cdot e^{j39^\circ 833} \text{ 1/м}$
			$Z_B = 1,405 \cdot e^{j43^\circ 641} \text{ Ом}$
			$Z_{\Gamma} = 2,035 \cdot 10^3 \cdot e^{j3^\circ 807} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Некоторое различие в значениях параметров первой группы от параметров второй обусловлено тем, что в расчетах для первой группы использовался радиус  $r_T$ , для второй –  $r_T$  и  $r'_T$ . Практическое совпадение соответствующих параметров в группах позволяет при оценочных расчетах ограничиться для всех типов покрытия решением уравнения (18) с последующим использованием уравнения (24) при учете влияния границы грунт–воздух.

Таким образом, в предлагаемой методике определения электромагнитных параметров подземных трубопроводов предварительный расчет, включающий в себя и фактор влияния границы грунт–воздух, допустимо проводить для трубопровода без покрытия. Учет покрытия выполняется путем коррекции сопротивления утечки по формулам (22) и (25) с последующим вычислением остальных параметров по соотношениям (21), (19) и (20).

### Заключение

Разработанная методика расчета электромагнитных параметров трубопроводов с антикоррозионным покрытием применима и для трубопроводов, окруженных цилиндрическим слоем естественного грунта с измененными свойствами, обусловленными процессами

спекания, искрообразования, коронирования и т.д.

Антикоррозионное покрытие существенно увеличивает переходные сопротивления между трубопроводом и грунтом, что приводит к уменьшению коэффициента затухания волны и скорости ее распространения.

Наиболее важным результатом проведенного исследования являются частотные характеристики коэффициентов затухания  $\alpha(\omega)$  и фазы  $\beta(\omega)$ , необходимые для расчета конфигурации, скорости и других параметров движущегося по трубопроводу токового импульса.

### Список литературы

1. Михайлов М.И., Разумов Л.Д. Электрические параметры подземных металлических трубопроводов // Электричество. – 1963. – № 5. – С. 60–64.
2. Электротехнический справочник в 3 т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / под общ. ред. Г. Герасимова, П.Г. Грудинского, Л.А. Жукова и др. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Энергия, 1980. – 520 с.
3. Анализ аварий и несчастных случаев на объектах газового надзора / Б.А. Красных, В.Ф. Мартынюк, Т.С. Сергиенко и др. – М.: ООО «Анализ опасностей», 2003. – 320 с.
4. Зоммерфельд А. Электродинамика. – М., 1958. – 501 с.
5. Carson J.R. Wave Propagation in overhead wires with Ground Return // Bell System Tech Journal. – 1926. – Oct, vol. 5. – № 4. – P. 539–554.
6. Гринберг Г.А., Бонштедт Б.Э. Основы точной теории волнового поля линии передачи // МТФ. – 1954. – Т. XXIV, вып. 1. – С. 223–554.

7. **Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П.** Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.

8. **Слышалов В.К., Киселева Ю.А.** Электромагнитное поле протяженного заземлителя, проложенного параллельно границе раздела воздух–грунт // Вестник ИГЭУ. – 2005. – Вып. 1. – С. 62–69

9. **Полевая** и цепная модели волновых процессов в протяженном заземлителе / В.К. Слышалов, П.В. Голов, Ю.А. Киселева и др. // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 2. – С. 50–58.

10. **Sunde E.D.** Currents and Potentials Along Leaky Ground-Return Conductors // Electrical Engineering. – 1936. – December (12).

*Слышалов Владимир Константинович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры электрических систем,  
телефон (4932) 38-57-79,

*Кандалов Юрий Владимирович,*  
Филиал ОАО «СО ЕЭС "Ивановское РДУ"»,  
кандидат технических наук, начальник отдела сопровождения рынка,  
телефон (4932) 34-99-25,  
e-mail: artyr\_198353@mail.ru