

ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІННОЇ СКЛАДОВОЇ СТРУМУ В ПІДЗЕМНОМУ ТРУБОПРОВОДІ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ ПРИЙМАЛЬНИХ КОТУШОК

© Стрілецький Ю.Й., Кісіль І.С., 1998

Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

Наведено способи визначення струму в підземному трубопроводі вимірюванням напруженості магнітного поля, створеного протіканням у трубопроводі досліджуваного струму. Всі способи дають змогу визначити струм без попереднього встановлення положення осі підземного трубопроводу.

Одним із шляхів вдосконалення безконтактного методу вимірювання змінного струму в підземному трубопроводі з метою підвищення точності вимірювання є використання системи приймальних котушок, які певним чином орієнтовані в просторі [1].

На рис.1 показано графік залежності горизонтальної складової напруженості магнітного поля H (крива 1), яке створене струмом, що протікає в матеріалі трубопроводу. Максимальне значення напруженості цього поля H знаходиться над віссю трубопроводу, оскільки лінії напруженості магнітного поля над віссю трубопроводу паралельні до горизонтальної осі X . У своїй верхній частині крива 1 добре збігається із параболою (крива 2). Отже, маючи деякі значення горизонтальної складової магнітної напруженості H , що виміряні на різних відстанях від трубопроводу по обидві його сторони, можна визначити координати вершини параболи. При малих відстанях від приймальних котушок до осі трубопроводу по горизонталі X різниця між дійсними значенням виміряних напруженостей H і параболічною зміною H залежно від X є незначною.

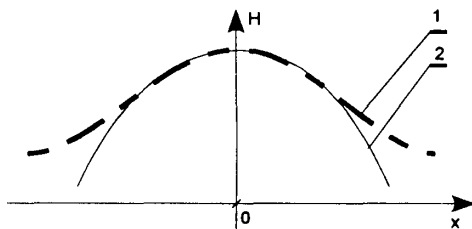


Рис.1. Залежність горизонтальної складової напруженості магнітного поля H створеного струмом у трубопроводі від відстані по горизонталі від осі трубопроводу X .

Для апроксимації $H = f(x)$ квадратним поліномом необхідно визначити не менше трьох

значень напруженостей над трубопроводом. Застосовуючи три приймальні котушки, які розташовані на одній лінії на фіксованій відстані $2 \cdot a$ одна від одної і нормалі яких орієнтовані горизонтально до землі і знаходяться в площині, перпендикулярній до осі трубопроводу, запишемо, що

$$\begin{cases} H_1 = A \cdot x^2 + B \cdot x + C; \\ H_2 = A \cdot (x + 2 \cdot a)^2 + B \cdot (x + 2 \cdot a) + C; \\ H_3 = A \cdot (x + 4 \cdot a)^2 + B \cdot (x + 4 \cdot a) + C, \end{cases} \quad (1)$$

де H_1, H_2, H_3 – напруженості магнітного поля, які виміряні відповідно 1, 2 і 3 котушками; x – горизонтальна координата розташування першої котушки щодо осі підземного газопроводу.

Для розв'язку цієї системи рівнянь стосовно A, B, C прийемо, що система координат по осі x збігається з центром другої котушки. Тоді система рівнянь (1) набуде такого вигляду:

$$\begin{cases} H_1 = A \cdot 4 \cdot a^2 - B \cdot 2 \cdot a + C; \\ H_2 = C; \\ H_3 = A \cdot 4 \cdot a^2 + B \cdot 2 \cdot a + C, \end{cases} \quad (2)$$

а розв'язком цієї системи буде

$$\begin{aligned} A &= (H_3 - 2 \cdot H_2 + H_1) / (8 \cdot a^2), \\ B &= (H_3 - H_1) / (4 \cdot a), \\ C &= H_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Координати знаходження максимального значення напруженості магнітного поля, а отже, і осі трубопроводу, знайдемо з умови, що

$$\frac{dH}{dx} = 0. \quad (4)$$

Тоді, використавши перше рівняння системи (1) можна записати, що вісь трубопроводу знаходиться на такій відстані від другої котушки:

$$X_{max} = a \cdot \frac{H_1 - H_3}{H_3 - 2 \cdot H_2 + H_1}. \quad (5)$$

Підставивши X_{max} в перше рівняння системи (1), можна визначити значення максимальної напруженості

$$H_{max} = -\frac{1}{8} \cdot \frac{(H_1 - H_3)^2}{H_3 - 2 \cdot H_2 + H_1} + H_2. \quad (6)$$

Для знаходження значення струму в трубопроводі необхідно визначити відстань по вертикалі від осі трубопроводу до приймальної котушки h . Це можна здійснити, ввівши додаткову четверту котушку, встановлену перпендикулярно до третьої (рис.2). Значення глибини залягання трубопроводу можна визначити за формулою [2]

$$h = (X_{max} + a) \cdot \frac{H_3}{H_4}, \quad (7)$$

де H_4 – значення вертикальної складової напруженості магнітного поля виміряна 4 котушкою.

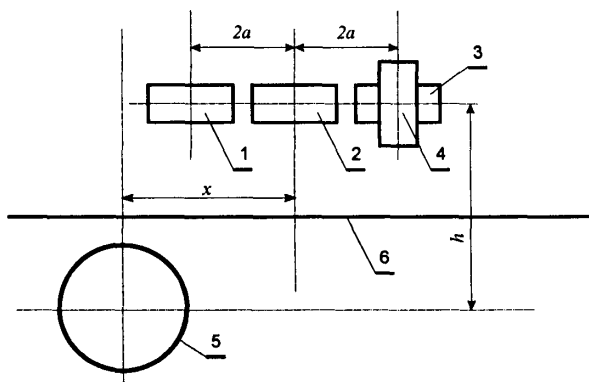


Рис. 2. Схема розташування приймальних котушок при апроксимації результатів вимірювання.

На основі отриманих значень h і H_{max} можна обчислити струм I у трубопроводі, використовуючи таку відому залежність для провідника із струмом [3]:

$$I = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot H_{max}. \quad (8)$$

На основі залежностей (5)-(8) можна розробити прилад для безконтактного визначення значення змінного струму в трубопроводі при знаходженні оператора з приймальними котушками над поверхнею трубопроводу в деяких межах від вертикальної осі трубопроводу. Це зумовлено тим, що тільки на вершині парабола збігається із реальними значеннями напруженості магнітного поля. Чим глибше в землі знаходиться трубопровід, тим менша кривизна горизонтальної складової, тим у ширших межах відстаней від приймальних котушок до осі трубопроводу по горизонталі можна вважати, що вершина розрахованої параболи збігається з реальними значеннями максимальної напруженості над віссю трубопроводу.

Описаний спосіб вимірювання має суттєвий недолік. Він базується на наближеній формулі для апроксимації результатів вимірювання, крім того, для визначення глибини і струму в трубопроводі використані абсолютні значення напруженості магнітного поля над трубопроводом. Тому на результати можуть впливати сторонні електромагнітні поля, які створені лініями електропередач, блукаючими струмами, іншими розміщеними неподалік трубопроводами тощо. Однак даний спосіб простий у реалізації.

Для точної відповідності між вимірними значеннями напруженості магнітного поля і струмом у трубопроводі можна застосувати залежність для визначення напруженості магнітного поля створеного трубопроводом (8), а саме

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot R}, \quad (9)$$

де R – відстань від трубопроводу до точки спостереження.

З метою встановлення точних залежностей між горизонтальною складовою магнітного поля і положенням приймальної котушки над трубопроводом детально розглянемо рис.3 на якому схематично зображено розташування приймальної котушки 1 щодо поверхні землі 6 і трубопроводу 5.

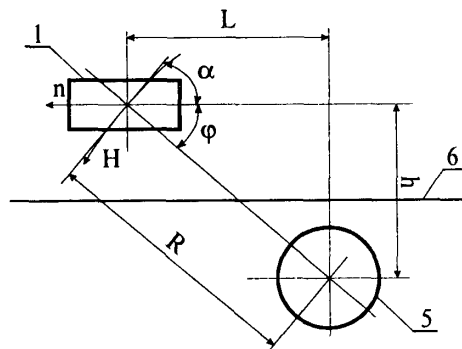


Рис. 3. Схема розташування приймальної котушки 1 над трубопроводом.

Нормаль котушки n (напрямок вказано умовно) є перпендикулярною до осі трубопроводу і паралельною до поверхні землі. Приймальна котушка знаходиться в полі магнітного поля, умовно зображеного вектором H .

Коефіцієнт магнітної проникності ґрунту близький до одиниці [4], тому на результати вимірювання напруженості магнітного поля вплив ґрунту є незначним і ним можна нехтувати. Внаслідок цього відстань від котушки до поверхні ґрунту, в подальших розрахунках величина струму I , не враховується.

Електрорушійна сила, яка виникає в обмотці приймальних котушок дорівнює

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (10)$$

де Φ – магнітний потік, що пронизує котушку площею S і який визначаємо за формулою

$$\Phi = H \cdot S \cdot \mu, \quad (11)$$

де μ – магнітна проникність середовища.

Якщо вважати, що значення S і μ є незмінними, то на зміну магнітного потоку впливає тільки H . Достатньо визначити параметр H за формулою (11) для будь-якого положення котушки

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot R} \cdot \cos(\alpha), \quad (12)$$

де α – кут між напрямом вектора напруженості і нормаллю до площини котушки.

З рис.3 видно, що

$$90 - \alpha = \varphi, \quad (13)$$

$$\cos(\alpha) = \sin(90 - \alpha) \quad (14)$$

Тоді

$$\sin(\varphi) = \cos(\alpha) = \frac{h}{R}. \quad (15)$$

Враховуючи

$$R = \sqrt{h^2 + L^2}, \quad (16)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{h}{\sqrt{h^2 + L^2}}, \quad (17)$$

отримаємо, що для котушки встановленої горизонтально,

$$H = \frac{I \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot (h^2 + L^2)}. \quad (18)$$

З формули (18) видно, що на значення H впливають три величини: струм I в трубопроводі, відстань від котушки до осі трубопроводу відповідно по вертикалі і горизонталі h і x .

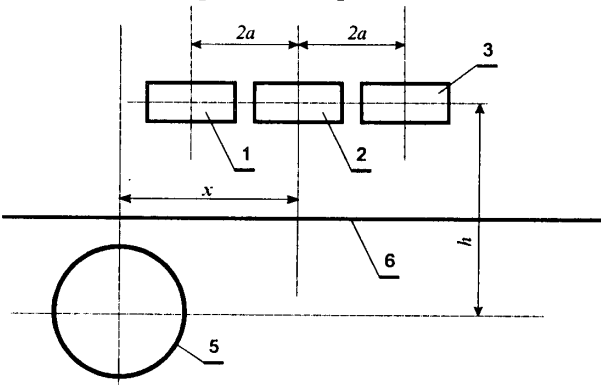


Рис. 4. Схема розташування приймальних котушок при три-компонентному вимірюванні магнітного поля.

За допомогою приймальної котушки можна виміряти значення H в певній точці простору. Значення h і x повинні або бути заданими, або наперед визначеними. Якщо виміряти співвісними приймальними котушками декілька значень напруженості поля в точках на відстані $2 \cdot a$ одна від одної (рис.4), тобто в точках з координатами $(x-2a, h)$, (x, h) і $(x+2a, h)$, то можна записати систему трьох рівнянь з трьома невідомими I, h, x і двома відомими H і a

$$\begin{cases} H_1 = \frac{I \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot (h^2 + (x - 2 \cdot a)^2)}; \\ H_2 = \frac{I \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot (h^2 + x^2)}; \\ H_3 = \frac{I \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot (h^2 + (x + 2 \cdot a)^2)}. \end{cases} \quad (19)$$

Порівняємо вирази для струму з першого та другого рівняння системи (19) і першого та третього рівнянь. З кожного з отриманих рівнянь знаходимо, що

$$\begin{cases} h^2 = \frac{H_2 \cdot x^2 - H_1 \cdot (x - 2a)^2}{H_1 - H_2}; \\ h^2 = \frac{H_3 \cdot (x + 2a)^2 - H_1 \cdot (x - 2a)^2}{H_1 - H_3}. \end{cases} \quad (20)$$

Звідси

$$x = \frac{2 \cdot a \cdot H_2 \cdot (H_1 - H_3)}{2 \cdot (H_1 \cdot H_2 + H_2 \cdot H_3 + 2 \cdot H_1 \cdot H_3)}. \quad (21)$$

Описані залежності (19)-(21) дають можливість визначити струм у трубопроводі з меншими затратами часу і більшою точністю, оскільки нема потреби проводити вимірювання безпосередньо над трубопроводом, а положення котушок визначається при вимірюванні. Оскільки при цьому використані абсолютні значення напруженості поля, то такий метод також має дещо обмежене використання. Він придатний при застосуванні додаткового збуджуючого генератора, який приєднується до трубопроводу для створення поля певної частоти, при незначних сторонніх перешкодах. Для оцінки зміни напруженості поля, спричиненої вмиканням СКЗ, можна також застосувати комутовані станції катодного захисту (СКЗ).

Для того, щоб відмовитись від додаткового генератора і використовувати будь-яку СКЗ як джерело електромагнітного поля, необхідно припустити, що в місці проведення вимірювань сторонні електромагнітні поля рівномірно впливають на всі котушки системи. Тоді систему (19) можна записати у такому вигляді:

$$\begin{cases} H_1 - H' = \frac{I \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot (h^2 + (x - 2 \cdot a)^2)}; \\ H_2 - H' = \frac{I \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot (h^2 + x^2)}; \\ H_3 - H' = \frac{I \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot (h^2 + (x + 2 \cdot a)^2)}; \end{cases} \quad (22)$$

де H' – значення напруженості сторонніх полів.

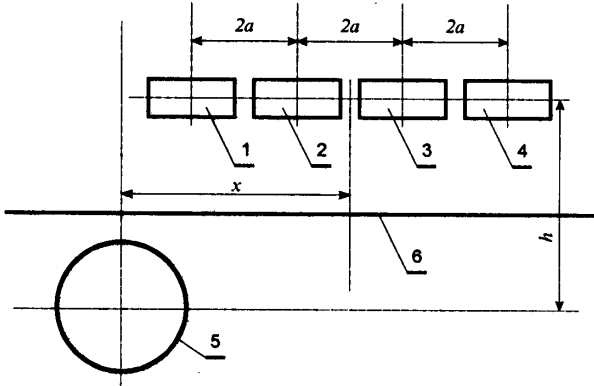


Рис. 5. Схема розташування приймальних котушок при чотири-компонентному вимірюванні магнітного поля.

Для розв'язку системи (22) стосовно I необхідно застосувати в процесі вимірювання ще одну котушку 4 (рис.5). Для простоти обчислень встановимо додаткову котушку співвісно з першими трьома на відстані $2 \cdot a$ від третьої котушки. Нормаль четвертої котушки направлена в ту ж сторону, що й нормалі трьох інших котушок. Тоді система рівнянь (22) набуде такого вигляду:

$$\begin{cases} H_1 - H' = \frac{I \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot (h^2 + (x - 3 \cdot a)^2)}; \\ H_2 - H' = \frac{I \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot (h^2 + (x - a)^2)}; \\ H_3 - H' = \frac{I \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot (h^2 + (x + a)^2)}; \\ H_4 - H' = \frac{I \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot (h^2 + (x + 3 \cdot a)^2)}; \end{cases} \quad (23)$$

де a – значення, яке дорівнює половині відстані між приймальними котушками.

Для розв'язку системи (23) віднімемо від всіх рівнянь системи третє рівняння і після відповідних перетворень отримаємо

$$\begin{cases} H_1 - H_3 = H_{13} = \frac{I \cdot h \cdot [(h^2 + (x + a)^2) - (h^2 + (x - 3 \cdot a)^2)]}{2 \cdot \pi \cdot (h^2 + (x - 3 \cdot a)^2) \cdot (h^2 + (x + a)^2)}; \\ H_2 - H_3 = H_{23} = \frac{I \cdot h \cdot [(h^2 + (x + a)^2) - (h^2 + (x - a)^2)]}{2 \cdot \pi \cdot (h^2 + (x - a)^2) \cdot (h^2 + (x + a)^2)}; \\ H_4 - H_3 = H_{43} = \frac{I \cdot h \cdot [(h^2 + (x + a)^2) - (h^2 + (x + 3 \cdot a)^2)]}{2 \cdot \pi \cdot (h^2 + (x + 3 \cdot a)^2) \cdot (h^2 + (x + a)^2)}. \end{cases} \quad (24)$$

Виразивши з першого і другого рівняння I , прирівнюємо і виражаємо h

$$\begin{cases} h^2 = \frac{H_{23} \cdot (x - a)^2 \cdot [(x + a)^2 - (x - 3 \cdot a)^2] - H_{13} \cdot (x - 3 \cdot a)^2 \cdot [(x + a)^2 - (x - a)^2]}{H_{13} \cdot [(x + a)^2 - (x - a)^2] - H_{23} \cdot [(x + a)^2 - (x - 3 \cdot a)^2]}; \\ h^2 = \frac{H_{43} \cdot (x + 3 \cdot a)^2 \cdot [(x + a)^2 - (x + 3 \cdot a)^2] - H_{13} \cdot (x - 3 \cdot a)^2 \cdot [(x + a)^2 - (x + 3 \cdot a)^2]}{H_{13} \cdot [(x + a)^2 - (x + 3 \cdot a)^2] - H_{43} \cdot [(x + a)^2 - (x - 3 \cdot a)^2]}. \end{cases} \quad (25)$$

Прирівнявши значення h з двох рівнянь (25) отримаємо значення x для заглибленого трубопроводу

$$x = \pm \frac{2 \cdot a \cdot \sqrt{(4 \cdot H_{43} \cdot H_{23}^2 - 3 \cdot H_{23} \cdot H_{13} \cdot H_{43} - H_{23}^2 \cdot H_{13}) \cdot (H_{43} - H_{13})}}{H_{23} \cdot H_{13} - 4 \cdot H_{23} \cdot H_{43} + 3 \cdot H_{43} \cdot H_{13}} \quad (26)$$

Знак відстані визначається з різниці напруженостей між 1 і 4 котушкою. Якщо знак різниці від'ємний, то і значення x від'ємне.

Значення глибини залягання розраховується за допомогою одного із рівнянь системи (25), а значення струму – за одним з рівнянь системи (24). Якщо різниця значень напруженостей між першою і четвертою котушками однакова, то відстань по поверхні землі від середини системи приймальних котушок до трубопроводу по

горизонталі дорівнює 0. У цьому разі значення напруженостей, які відповідно сприйняті котушками 1,2 і 4,3, за модулем однакові.

Отже, залишаються інформативними напруженості тільки в двох точках. При цьому невідомі глибина залягання, струм у трубопроводі і значення сторонніх полів. Якщо нехтувати значенням зовнішнього поля, то можна визначити глибину залягання трубопроводу і струм у трубопроводі.

Проте, зберігаючи заводозахисненість методу, щоб знаходити значення струму в трубопроводі при будь-яких положеннях системи приймальних котушок необхідно змінити їх розташування так, щоб котушки залишались співвісними, але не мали осі симетрії перпендикулярної до нормалей котушок. Для цього можна змістити котушку 4 на a до 3 котушки. Отримаємо координати встановлення котушок (x, h) , $(x+2 \cdot a, h)$, $(x+4 \cdot a, h)$, $(x+5 \cdot a, h)$. Встановивши початок координат по горизонталі між 2 і 3 котушками, систему рівнянь (23) запишемо

$$\begin{cases} H_1 - H' = \frac{I \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot (h^2 + (x - 3 \cdot a)^2)}; \\ H_2 - H' = \frac{I \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot (h^2 + (x - a)^2)}; \\ H_3 - H' = \frac{I \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot (h^2 + (x + a)^2)}; \\ H_4 - H' = \frac{I \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot (h^2 + (x + 2 \cdot a)^2)}; \end{cases} \quad (27)$$

Провівши аналогічні описаним вище перетворення отримаємо, що відстань від осі до системи котушок по вертикалі визначається за співвідношеннями

$$\begin{cases} h = \frac{(-8 \cdot H_{43} - 2 \cdot H_{13}) \cdot x^3 + (-24 \cdot H_{43} \cdot a + 9 \cdot H_{13} \cdot a) \cdot x^2 + 32 \cdot H_{43} \cdot a^3 - 27 \cdot H_{13} \cdot a^3}{(-8 \cdot H_{43} - 2 \cdot H_{13}) \cdot x - 3 \cdot H_{13} \cdot a + 8 \cdot H_{43} \cdot a}; \\ h = \frac{(2 \cdot H_{23} - H_{13}) \cdot x^3 + (-6 \cdot H_{23} \cdot a + 6 \cdot H_{13} \cdot a) \cdot x^2 + (6 \cdot H_{23} \cdot a^2 - 9 \cdot H_{13} \cdot a^2) \cdot x - 2 \cdot H_{23} \cdot a^3}{(H_{13} - 2 \cdot H_{23}) \cdot x + 2 \cdot H_{23} \cdot a}, \end{cases} \quad (28)$$

а відстань від умовної середини системи котушок до осі трубопроводу по горизонталі визначається так:

$$x_{1,2} = \frac{1}{4} \cdot a \cdot \frac{A \pm \sqrt{B}}{A}, \quad (29)$$

де $A = 6 \cdot H_{43} \cdot H_{23} - H_{13} \cdot H_{23} - 5 \cdot H_{13} \cdot H_{43}$,

$$\begin{aligned} B = & 49 \cdot H_{13}^2 \cdot H_{23}^2 + 250 \cdot H_{13}^2 \cdot H_{23} \cdot H_{43} - \\ & - 348 \cdot H_{13} \cdot H_{23}^2 \cdot H_{43} + 25 \cdot H_{13}^2 \cdot H_{43}^2 - \\ & - 300 \cdot H_{13} \cdot H_{23} \cdot H_{43}^2 + 324 \cdot H_{43}^2 \cdot H_{23}^2. \end{aligned}$$

Значення струму в трубопроводі можна визначити за методикою, аналогічною до описаної вище, використовуючи системи (28) і (29).

Так отримується можливість визначення значення змінної складової струму в підземному трубопроводі при будь-якому положенні системи котушок, вісь яких не перпендикулярна до осі трубопроводу і знаходиться в площині, перпендикулярній їй.

Співвісне розташування приймальних котушок має переваги перед іншим способом встановлення. Для роботи такої системи котушок необхідно лише встановити її так, щоб вісь трубопроводу була перпендикулярна до площини, в якій знаходиться вісь системи котушок.

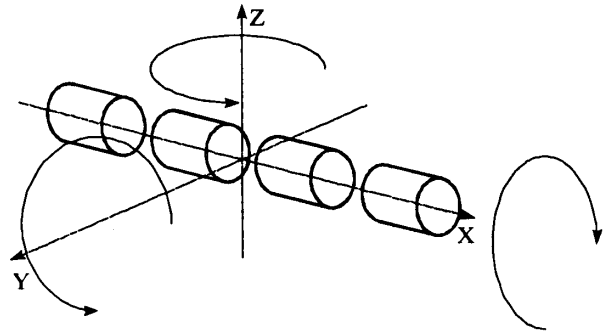


Рис. 6. Схема розташування системи котушок у просторі.

На рис.6 зображено схему розташування системи котушок у просторі. Під час роботи необхідно стежити тільки за поворотом системи щодо осі Z.

1. Стрілецький Ю.Й. Розробка удосконаленого способу безконтактного контролю змінної складової струму в підземному газопроводі // Методи та прилади контролю якості. 1997. №1. С.15-18 2. А. с. 1308905, G01R19/00. Устройство для бесконтактного измерения токов в подземных магистральных трубопроводах / Р.М.Джала // Открытия. Изобретения. 1987. №17. 3. Брунов Б.Я., Гольденберг Л.М., Кляцкин И.Г., Цейтлин Л.А. Теория электромагнитного поля. М., 1962. 4. Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М., 1982.