

УДК 550.832

## АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ ПРИ КОНТРОЛІ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБСАДНИХ КОЛОН

*В.А.Старостін, В.І.Проконів, Г.С.Винничук*

*ІФНТУНГ, 76019 м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,*

*Івано-Франківська експедиція з геофізичних досліджень в свердловинах, (76002, м. Івано-Франківськ, вул. Українських Декабристів, 54, тел./факс: (03422) 2-42-14)*

*В исследовании технического состояния механических колонн методами электромагнитной дефектоскопии известны два направления построения измерительных систем. Это - метод анализа монохромного электромагнитного сигнала и метод импульсного электромагнитного зондирования, построенного на анализе переходных процессов.*

*В статье предлагается повысить интерпретационные возможности определения дефектов и толщины колонны путем автоматического учета параметров электромагнитных свойств материалов труб, построенного на использовании численной оптимизации с ограничениями.*

*Ключевые слова: электромагнитная дефектоскопия, магнитная индукция, монохромное электромагнитное поле, картаж, геофизические методы.*

Аналіз технічного стану експлуатаційних і технічних колон в нафтогазовій промисловості України є дуже актуальним. Запобігання екологічним катаклізмам, викликаних руйнуванням устаткування внаслідок довготривалих термінів його експлуатації, є невід'ємною складовою більшої частини питань охорони довкілля. Чимале значення також має контроль технічного стану експлуатаційних і технічних колон на етапі будівництва свердловини.

В арсеналі геофізичних досліджень технічного стану металевих колон методами електромагнітної дефектоскопії відомі два напрямки побудови вимірювальних систем. Це метод дослідження технічних і електромагнітних параметрів колон шляхом аналізу монохромного електромагнітного сигналу та метод імпульсного електромагнітного зондування, побудований на аналізі перехідних електромагнітних процесів, що виникають в металевих колонах.

На озброєнні геофізичної промисловості України перебуває велика кількість індукційних дефектоскопів (ДСИ), з застосуванням яких в свій час виконували значний обсяг досліджень.

Проведемо аналіз двох напрямків побудови вимірювальних систем електромагнітної дефектоскопії.

*There are known the two directions of measuring systems constructing at checking the casing string technical quality: the analysis method of a monochrome electromagnetic signal and method of impulse electromagnetic sounding constructed on analysis of transient processes.*

*In article it is offered to increase the interpretation possibilities of definition the defects and thickness of borehole line. The numerical optimization with limitations for the automatic recount parameters of electromagnetic properties of borehole line materials is used.*

Значний вклад в розвиток апаратури імпульсного електромагнітного зондування зроблено співробітниками ВНДІГДС [1]. Створено декілька модифікацій малогабаритних дефектоскопів-товщиномірів, які дають змогу аналізувати технічний стан обсадних, експлуатаційних колон та НКТ.

Апаратура розроблялась в три етапи. Прилади першого етапу показали високу чутливість до визначення параметрів поздовжніх тріщин і товщини труб, а також можливість дослідження параметрів другої колони. Мінімальний розмір тріщин, розташованих вздовж осі свердловини, що піддавався аналізу, становив не менше 100 – 150 мм. При значних перешкодах ці розміри збільшуються. Така характеристика роботи приладів зумовлена низьким рівнем корисного сигналу, можливими додатковими мікротріщинами і значною неоднорідністю магнітної сприйнятливості металу колон. При дослідженні зовнішніх колон мінімальні розміри тріщин, що піддаються аналізу, становлять 400 – 600 мм. Проводилось визначення інтегральної, середньої по колу товщини стінки колони за допомогою градувальних залежностей, отриманих на моделях. Зміна електромагнітних властивостей матеріалу, з якого виготовлені колони, призводила до значних похибок.

На другому етапі модернізації апаратури збільшується кількість каналів реєстрації становлення електромагнітного поля, що дає змогу розширити діапазон виміру параметрів і точність досліджень.

На третьому етапі змінюється конструкція зондового пристрою установкою датчиків поперечного електромагнітного поля, за рахунок чого можна визначати поперечні тріщини.

В наш час в різних нафтогазових регіонах Росії використовується апаратура трьох видів, застосуванням якої реалізують метод електромагнітної імпульсної дефектоскопії: МИД-К, МИД-Газпром, ЭМДС-ТМ, ЭМДСТ-МП(ГК). Як вказано в [2], апаратура всіх трьох модифікацій дає змогу вирішувати однаковий обсяг питань. Більшими можливостями характеризується апаратура ЭМДСТ-МП(ГК) і, на думку авторів, це пов'язано з досвідом проведення робіт в боковому стовбурі, який забурено зі старих свердловин. Загалом прилади мають однакові можливості.

Дуже актуальною розробкою було створення автономного приладу магнітоімпульсного дефектоскопа МИД-А. Автономні прилади мають переваги, які характеризуються відсутністю електричних перешкод і спотворень в лінії зв'язку і на колекторі підйомника, спрощенням технології проведення досліджень, надійністю в роботі на свердловинах з лубрикатором та більш високою корозійністю за рахунок використання троса, а не геофізичного кабеля.

Магнітоімпульсна дефектоскопія дає можливість вирішувати ряд технічних завдань, пов'язаних з визначенням положення муфтових з'єднань експлуатаційних і технічних колон, визначенням якості згинчування різьбових з'єднань, перевіркою відповідності проекту інтервалів установки секцій з різними внутрішніми діаметрами і товщиною, визначенням інтервалів пошкодження експлуатаційних колон, інтервалів і ступеня корозійного зносу, товщини стінки і глибини спуску НКТ.

Розглянемо інтерпретаційні можливості методу електромагнітної дефектоскопії.

Як згадувалося, на сьогоднішній день значна увага приділяється впровадженню імпульсної електромагнітної дефектоскопії. Метод базується на дослідженні електрорушійної сили, наведеної в обсаджених колонах після відключення струму намагнічування. Теоретична база цього методу належить до категорії "Зондування становлення електромагнітного поля", що успішно використовувалось при зондуванні геологічного розрізу на поверхні Землі. Свердловинна апаратура дає можливість реєст-

рувати величину електрорушійної сили в інформаційних каналах в функції часу. Кожен канал має певний часовий інтервал, в якому реєструється величина електрорушійної сили.

Обробка геофізичної інформації проводиться двома шляхами: оперативна і кількісна, на основі розрахунків за спеціальними автоматизованими алгоритмами обробки. Інтерпретація починається з прив'язки до глибини конструктивних елементів свердловини: пакери, клапани, башмаки колони, інтервали перфорації. Характеристика зміни аномалій поля визначається величиною товщини колони, електропровідності і магнітної проникності матеріалу, з якого вона виготовлена. Чим більший добуток цих параметрів, тим повільніше згасають вихрові струми. До швидкого згасання поля призводить розгалуження тріщин, що утворилися при перфорації або при інших силових впливах на колону. Крім відносних параметрів зміни аномалій, використовуються характеристики форм. Дослідження форм і амплітуд аномалій проводять на моделях. Використання принципу моделювання для методів електромагнітної дефектоскопії при побудові інтерпретаційних залежностей є теоретично обґрунтованим шляхом. Результати вимірів позірних значень електромагнітних властивостей максимально наближені до дійсних, що зумовлено відсутністю впливу свердловинних умов і вміщуючих порід.

Зміна значень параметрів електромагнітних властивостей ( $\sigma$  і  $\mu$ ) є визначальною при дослідженні технічних параметрів колон, але  $\sigma$  і  $\mu$  можуть залежати не тільки від заводських технологій виготовлення і складу металу труб, але й від часової зміни їх технічних параметрів під дією циклічних механічних навантажень та корозії. Електрохімічні потенціали, які можуть виникати на поверхні колон, утворюють локальні джерела корозії. Ці джерела можуть розповсюджуватися на великі відстані і з часом їх щільність на площині зростає. Окремі джерела руйнують колону до наскрізних отворів. За рахунок значної кількості джерел корозії електромагнітні властивості матеріалу змінюються на великих відрізках колони. Процеси корозії призводять як до зміни електропровідності, так і до зміни магнітної проникності.

Для приведення відповідності значень електричних сигналів до товщини стінки колони здебільшого використовують градування, але такий метод має певні похибки, пов'язані з неможливістю контролю змін характеристик матеріалу колон і магнітної обстановки.

Перехід до кількісної інтерпретації отри-

маної інформації і визначення параметрів середовища  $\mu, \sigma, t$  ( $t$ -товщина стінки колони), які характеризують металеву колону, потребує розвитку теоретичної бази цього методу. В роботах [3,4] використовується чисельне моделювання вимірів методом магнітно-імпульсної дефектоскопії.

Розглянемо її в такій постановці математичної моделі.

На осі симетрії однорідного середовища з  $N$  - коаксіально-циліндричними поверхнями розподілу на відстані  $L$  одна від другої розташовані генераторна і вимірювальна котушки. Необхідно визначити встановлення поля в точці розташування вимірювальної котушки.

Враховуючи осьову симетрію задачі, використовують циліндричну систему координат  $R, \Phi, Z$ . Початок координат зміщується з генераторної котушкою, і вона розглядається як магнітний диполь з моментом  $M_z = M e_z$ , вісь  $Z$  спрямована вздовж осі симетрії. Параметри, які описують циліндричні межі  $r_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ),  $\sigma_i$  - електропровідність;  $\varepsilon_{ai}$  - діелектрична проникність;  $\mu_{ai}$  - магнітна проникність і квадрат хвильового числа  $\kappa_i^2 = \mu_{ai} \omega^2 \varepsilon_{ai} + i \mu_{ai} \omega \sigma_i$ ,  $\omega$  - частота.

Для визначення невстановленого процесу в коаксіально-циліндричному середовищі використовують спектральний аналіз.

При утворенні поля  $J(t) = 1$  при  $t < 0$ ,  $J(t) = 0$  при  $t > 0$  отримують

$$H(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_z(\omega) \frac{e^{-j\omega t}}{i\omega} d\omega, \quad (1)$$

де  $H_z(\omega)$  - магнітне поле на осі свердловини, яке вимірюється в одиницях поля магнітного диполя в повітрі

$$H_z(\omega) = h_z^0(k_0, L) - \frac{L^3}{\pi} \int_0^{\infty} m_0 c_0^2 \cos m dm, \quad (2)$$

де:  $h_z^0(k_0, L)$  - поле в однорідному середовищі з питомою провідністю  $\sigma_0$ ;  $m_i = \sqrt{m^2 - k_i^2}$  - товщина колони;  $c_0$  - константа, визначається за граничними умовами.

Для розрахунку становлення поля при заданому числі циліндричних поверхонь розподілу проводять числове інтегрування рівняння (2).

Пропонований алгоритм [3] реалізовано в програмному продукті. Експериментальні дослідження вказують на високу збіжність фізичного моделювання і теоретичних розрахунків. Використовуючи результати математичного

моделювання з застосуванням сучасної обчислювальної техніки, можливо в реальному часі визначати параметри: магнітної проникності, питомої електропровідності і товщини стінки металеві колони. Основним технологічним параметром, який необхідно визначити, є товщина стінки колони.

Отримавши стійкий алгоритм математичної моделі процесу становлення електромагнітного поля в часі, пропонується [4] використати метод умовної оптимізації для пошуку значень вектора  $\vec{P} = \{\mu_i, \sigma_i, m_i\}$ , де  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  - число металевих труб.

$$\Psi = \left\| E^*(t) - E(P, t) + \varepsilon \right\| \rightarrow \min, \quad (3)$$

де:  $\varepsilon$  - абсолютна похибка,  $E^*(t)$  - результати вимірів електрорушійної сили в приймальній котушці,  $E(P, t)$  - оператор розв'язку прямої задачі.

Пошук мінімуму функціонала  $\Psi$  пропонується проводити при слабких початкових наближеннях за обмеженою кількістю ітерацій для забезпечення поточної обробки геофізичної інформації. Запропонований алгоритм пройшов випробування на моделях і його використання значно підвищить достовірність визначення товщини стінки труб [4].

Розглянемо другий клас електромагнітних дефектоскопів, побудованих на використанні монохромного електромагнітного поля, яке створюється генераторною котушкою при подачі гармонічно змінного струму з амплітудою  $J_a$ .

$$J = J_a e^{-i\omega\tau} = \frac{\pi}{2} J_{cp} e^{-i\omega\tau}, \quad (4)$$

де  $J_a$  - миттєве значення струму,  $J_{cp}$  - середнє значення струму.

Генераторна і приймальна котушки установлені на спільній осі на відстані  $L_n$  одна від одної і характеризуються параметрами:  $l_g, l_p$  - висота котушки,  $n_g, n_p$  - кількість витків в котушці і  $r_g, r_p$  - радіус котушки. Середовище описується параметрами  $\sigma_i, \varepsilon_{ai}, \mu_{ai}$  і квадратом хвильового числа  $\kappa^2 = \omega^2 \varepsilon_a \mu_a + i \mu_a \sigma / \omega \varepsilon_a$ . Електромагнітне поле для цієї моделі буде мати компоненту  $H_z$  напруженості магнітної складової поля в точках, розташованих на полярній осі на відстані  $R=Z=L_n$  від генераторної котушки.

$$Hz = \frac{n_g s_g J_a \ell^{-i\omega\tau}}{2\pi} \frac{\ell^{ikL_n} (1 - ikL_n)}{L_n^3}, \quad (5)$$

де  $\kappa = a + ib$  і при  $\sigma \gg \omega\epsilon_a$   $a = b = \sqrt{\pi f \sigma \mu_a}$ .

Магнітне поле в приймальній котушці буде індукувати електрорушійну силу, яка визначається

$$e = -n_p s_p \frac{dB}{d\tau}, \quad (6)$$

де  $B$  – вектор магнітної індукції.

Середнє значення електрорушійної сили визначається

$$e_{cp} = i\mu_a f n_g s_g n_p s_p J_{cp} \frac{\ell^{ikL_n}}{L_n^3} (1 - ikL_n). \quad (7)$$

Після підстановки комплексного числа  $\kappa$  в рівняння  $Hz$ ,  $l_{cp}$  проведено аналіз і зроблені висновки [5]. Дійсна частина  $a$  хвильового числа визначає зсув фаз напруженості магнітного поля і утвореної електрорушійної сили відносно струму, який живить генераторну котушку залежно від електромагнітних властивостей середовища і частоти поля. Складова позірної частини хвильового числа характеризує інтенсивність загасання електромагнітного поля залежно від  $f, \mu_a, \sigma, \epsilon_a$ .

В середовищі (металеві колони) утворюється електрорушійна сила в замкнутому колі радіуса  $r$ , середнє значення якої зумовлено тільки змінним магнітним полем  $Hz$  генераторної котушки і дорівнює

$$e_r = i\omega\Phi = i2\pi\omega\mu_a \times \int_0^r Hz r dr = \frac{i\pi f \mu_a n_p s_p J_{cp} r^2}{R^3}. \quad (8)$$

Густина струму у витку буде дорівнювати

$$j_{\varphi,n} = \sigma E_f = \sigma \frac{e_r}{2\pi r} = iHz_{cp} r a^2, \quad (9)$$

де  $Hz_{cp}$  - середнє значення напруженості вертикальної складової магнітного поля на площі витка.

$$Hz_{cp} = \frac{n_g s_g J_{cp}}{2\pi R^3}. \quad (10)$$

Струм густиною  $j_{\varphi,n}$  має зсув фаз відносно струму, який живить генераторну котушку на величину  $\pi/2$ .

Вектор густини струму складається з активної складової  $J_a$ , яка збігається з вектором густини струму, безпосередньо індукованого у витку магнітним полем генераторної котушки,

рівної

$$j_a = j_{\varphi n} \ell^{-bR} [(1 - bR) \cos aR + aR \sin aR] \quad (11)$$

і реактивної складової

$$j_p = ij_{\varphi n} \ell^{-bR} [(1 - bR) \sin aR - aR \cos aR], \quad (12)$$

яка випереджує  $j_{\varphi,n}$  на  $\pi/2$ .

Величина струму залежить від параметрів  $R, \sigma$  і  $\mu_a$ , і зменшується зі зростанням  $R$  тим інтенсивніше, чим більші  $\sigma$  і  $\mu_a$ . Така залежність величини струму від радіуса колони пояснює зменшення чутливості методу при дослідженні параметрів другої і третьої колон.

При дослідженні технічних параметрів колон магнітна сприйнятливості є фактором перешкоди, але, враховуючи, що  $\mu_a = \mu_0(1 + \aleph)$ , прямий сигнал можливо представити величиною

$$e_{p,n} = \frac{i\mu_a f n_g s_g n_p s_p J_{cp}}{L_n^3} \quad (13)$$

прямий сигнал в повітрі і

$$\Delta e_{p,n} = \frac{i\mu_0 f n_g s_g n_p s_p J_{cp}}{L_n^3} \quad (14)$$

приріст прямого сигналу, який утворено магнітною сприйнятливостю металеві колони. Отримане відношення дає підстави для характеристики магнітних властивостей металевих колон.

Наведені рівняння дозволяють розраховувати величину електрорушійної сили, яка зумовлена тільки електромагнітними властивостями моделі і представлена коаксіально-циліндричними межами розподілу [5]. В області невеликих частот, там, де відсутній суттєвий вплив струмів зміщення, величина електрорушійної сили лінійно пов'язана з параметрами  $\aleph, \sigma$ .

Дві складові електрорушійної сили характеризують: одна магнітну сприйнятливості середовища, а друга - електропровідність. Зсув фаз між ними становить  $90^\circ$ . Метод монохромної електромагнітної дефектоскопії дає змогу окремо досліджувати дві складові електрорушійної сили, і ця інформація може бути використана як додаткова при розв'язанні оберненої задачі.

Розглянемо загальні проблеми, які виникають при проведенні електромагнітної дефектоскопії. Дослідження параметрів двох або трьох колонних конструкцій ускладнюється багатьма факторами, основний з яких - відстань

до об'єкта дослідження (внутрішній діаметр колони). Значення напруженості магнітного поля  $H_z$  зменшується на величину, пропорційну  $R^3$  (радіус колони), тобто для дослідження параметрів другої і третьої колон необхідно створити велику потужність електричного поля в генераторній котушці. Метод імпульсномагнітної дефектоскопії дає змогу збільшити потужність одиничного імпульсу і зберегти відношення "сигнал-завада" на рівні можливостей реєстрації слабких величин електрорушійної сили. Це досягається за рахунок відключення прямого поля під час реєстрації корисної інформації.

В методі монохромної електромагнітної дефектоскопії збільшення потужності генераторної ланки призводить до зростання величини прямого сигналу (сигналу перешкод) і порушує співвідношення корисного сигналу до завади. Це значно ускладнює застосування методу при дослідженні зовнішніх колон. Для зменшення величини прямого сигналу можна збільшити довжину зонда, при цьому погіршиться роздільна здатність виділення локальних дефектів, але збільшиться точність визначення товщини колони. Основним напрямком вдосконалення апаратури монохромної електромагнітної дефектоскопії при дослідженні другої колони є створення високочутливих смугових підсилювачів з високою стабільністю і перешкодостійкістю, які мають можливість виділяти слабкий сигнал при високому рівні шуму. Другим напрямком є поліпшення компенсації прямого поля за рахунок геометрії зондового пристрою. Величина прямого сигналу за рахунок корекції геометрії генераторної і приймальної котушок зменшується.

Для виділення сигналу від другої колони в методі монохромної електромагнітної дефектоскопії може бути використано величину градієнта функції електрорушійної сили від глибини. Дефекти другої колони будуть виділятися меншими градієнтами при однакових параметрах  $m, \sigma, \mu$ .

Другим завданням електромагнітної дефектоскопії є визначення товщини стінки колони. Для вирішення його використовують різні методичні прийоми. Зменшують паразитні впливаючі фактори шляхом вибору спеціального зондового пристрою або використанням систем автоматичного врахування параметрів  $\sigma$  і  $\mu$ . При дослідженні другої колони вносять в систему параметри товщини та внутрішнього діаметра першої колони.

В роботі [6] вказується на те, що введення

в автоматизовану систему напередвдомих середніх значень  $\mu$  і  $\sigma$  може призвести до значних похибок при визначенні товщини стінки. Ці похибки, як було вказано, залежать від технологічної і хімічної диференціації  $\mu$  і  $\sigma$ . Імовірно, що кращий шлях визначення параметрів колон полягає у використанні методу оптимізації для визначення комплексу параметрів.

Визначення параметрів вектора  $\vec{P} = \{\mu_i, \sigma_i, m_i\}$  методом оптимізації функціонала (3) характеризується неоднозначністю рішення оберненої задачі в геофізиці. Знаходження стійкого наближеного рішення, яке узгоджується з апріорною інформацією розглянуто А.Н. Тихоновим [7] та іншими при вирішенні проблеми регуляризації розв'язування систем геофізичних рівнянь. Стійкий розв'язок можна отримати тільки за наявності апріорної додаткової інформації.

Значення  $\mu$  і  $\sigma$  можуть бути використані як додаткова апріорна інформація, і тоді визначення  $m$  буде стійким. Як показали дослідження, параметри  $\mu$  і  $\sigma$  залежать від технології виготовлення обсаджених і експлуатаційних труб і можуть змінюватись в межах однієї труби, крім того, на величину параметрів впливають вторинні електрохімічні процеси. Тому використання середнього значення цих параметрів не завжди дасть позитивний результат.

Авторами [6] пропонується автоматичне врахування електромагнітних характеристик матеріалу металевих труб та їх технічних параметрів шляхом розв'язання оберненої задачі. Цей шлях зазвичай підвищує достовірність визначення товщини колони, але  $\mu$  і  $\sigma$  не визначається як апріорна інформація, тому отримати однозначний стійкий розв'язок неможливо. Використання апаратури з двома прямими зондами різної довжини значно збільшує однозначність рішення. Два незалежних виміри дають змогу скласти систему двох рівнянь, але невідомих параметрів для двох колон залишається шість.

Основним шляхом підвищення точності визначення технічного стану обсаджених і експлуатаційних колон є отримання незалежної додаткової інформації. В методі монохромної електромагнітної дефектоскопії за рахунок виміру складових електрорушійної сили, які характеризують одна магнітну сприйнятливість середовища, а друга електропровідність і мають зсув фаз на дев'яносто градусів, з'являється можливість отримати два незалежні інформаційні канали. Модернізація вимірювального приладу на двозондовий з різною базою

дасть змогу отримати чотири незалежних інформаційні канали. Апаратура ДСИ має можливість реєстрації каналу диференціального зонда. Використання градієнта функції електрорушійної сили до глибини дозволяє отримати додатковий параметр для регуляризації кінцевого рішення і дасть змогу за величиною градієнта проводити розподіл дефектів першої і другої колон при відповідних потужностях генеруючого поля.

Визначення приросту прямого сигналу вимірів в свердловині відносно до сигналу на повітрі дає можливість стабілізувати параметри розмірів інтенсивності вимірюваного сигналу.

Нами проводиться обґрунтування розробки нового приладу електромагнітного дефектоскопа, в основу якого буде покладено комплексування методів монохромної електромагнітної дефектоскопії і імпульсномагнітної дефектоскопії. Такий підхід дасть змогу однозначно визначати параметри першої колони за рахунок керування глибиною монохромного електромагнітного методу і спільного пошуку оптимального рішення. В свою чергу, це збільшить стійкість отриманого рішення по другій і третій колонах.

В теперішній час нами проводиться розробка алгоритму автоматичного врахування параметрів електромагнітних властивостей для методу монохромної електромагнітної дефектоскопії, заснованого на використанні чисельної оптимізації з обмеженнями. Цей алгоритм уможливить оперативне врахування додаткової інформації і в цих межах знаходження оптимального вектора параметрів

$$\vec{P} = \{\mu_i, \sigma_i, m_i\}.$$

Автоматична система обробки інформації зареєстрованою апаратурою ДСИ дасть змогу підвищити інтерпретаційні можливості визначення дефектів і товщини першої колони.

### Література

1. Сидоров В.А. Скважинные дефектоскопы - толщиномеры для исследования многоколонных скважин// НТВ «Каротажник». - Изд. АИС. - 1996. - Вып. 24. - С.83 – 94.
2. Шумилов А.В. Дефектоскопия скважин и контроль целевой гидропескоструйной перфорации методами ГИС// НТВ «Каротажник». - Изд. АИС. - 2001. - Вып. 79. - С.59 – 66.
3. Потапов А.В., Кнеллер Л.Е. Численное решение задачи становления поля магнитного диполя в скважинах многоколонной конструкции// НТВ «Каротажник». - Изд. АИС. - 1998. - Вып. 52. - С.77 – 81.
4. Потапов А.В., Кнеллер Л.Е. Интерпретация данных импульсной электромагнитной толщинометрии на основе решения прямой и обратной задачи// НТВ «Каротажник». - Изд. АИС. - 1999. Вып. 64. - С.85 – 91.
5. Дахнов В.Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин. - М.: Недра, 1981. - 344 с.
6. Потапов А.П. Влияние магнитной проницаемости и электропроводности металла обсадных колон на результаты скважинной импульсной электромагнитной дефектоскопии// НТВ «Каротажник». - Изд. АИС. - 2000. Вып. 75. - С.109 – 112.
7. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. - 287 с.