

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра Геофизики

«Электромагнитная дефектоскопия обсадных колонн»

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 5 курса 501 группы
направления (специальности) 05.03.01 Геология
код и наименование направления (специальности)
геологического факультета Саратовского
национального исследовательского государственного университета имени
Н.Г. Чернышевского
наименование факультета, института, колледжа
Николенко Данила Юрьевича
фамилия, имя, отчество

Научный руководитель
доктор физ.-мат. наук, профессор В. П. Губатенко
должность, уч. степень, уч. звание, дата, подпись инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой
кандидат геол.-мин. наук, доцент Е.Н. Волкова
должность, уч. степень, уч. звание дата, подпись инициалы, фамилия

Саратов 2019 год

Введение. Диагностика обсадных колонн является одной из важнейших задач технологического обслуживания скважин. Контроль прочности колонн необходим для предотвращения аварий и снижения больших затрат связанных с ними. Электромагнитные методы диагностики обсадных колонн относятся к наиболее надежным неразрушающим методам. Внедренные в производство образцы отечественной электромагнитной дефектоскопической скважинной аппаратуры заметно улучшили качество геофизического контроля обсадных колонн.

Целью настоящей бакалаврской работы является изучение возможностей современных электромагнитных методов диагностики обсадных колонн скважин. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Рассмотреть конструкцию скважин и общие сведения о креплении скважин.
2. Рассмотреть особенности технологии обсадных труб нефтегазовых скважин и повреждения труб в процессе эксплуатации.
3. Изучить коррозионные процессы в обсадных колоннах.
4. Рассмотреть различные воздействия механических факторов на деформацию обсадных труб.
5. Изложить методы контроля технического состояния скважин.
6. Изучить физические основы электромагнитной дефектоскопии.
7. Решить задачу о нахождении неустановившегося электромагнитного поля круговой петли в присутствии проводящей цилиндрической пленки Прайса-Шейнманна.

Основное содержание работы. Бакалаврская работа посвящена изучению возможностей электромагнитных методов диагностики обсадных колонн скважин.

В разделе 1 **«Причины возникновения дефектов обсадных колонн»** рассмотрены конструкция скважин, общие сведения о креплении скважин, особенности технологии изготовления обсадных труб нефтегазовых скважин,

повреждения труб в процессе эксплуатации, коррозионные процессы в обсадных колоннах, воздействие механических факторов на деформацию обсадных труб.

В разделе 2 «**Контроль технического состояния скважин**» отмечено, что в настоящее время геофизические методы контроля технического состояния скважин составляют значительную и важную часть исследований, проводимых в бурящихся скважинах и скважинах действующего фонда.

При изучении технического состояния обсаженных скважин выполняются следующие виды работ:

- контроль за качеством цементирования обсадных колонн и изучения текущего состояния обсадных колонн;
- геофизические исследования в эксплуатационных и нагнетательных скважинах с целью выявления зон затрубной циркуляции, определения профиля притока эксплуатационной скважины, профиля приемистости нагнетательной скважины.

При контроле технического состояния обсадных колонн геофизическими методами решают следующие основные задачи:

- определение внутреннего диаметра и профиля колонн;
- определение толщины стенки колонн;
- выделение муфтовых соединений и оценки их состояния;
- определение эксцентриситета обсадной колонны относительно оси скважины;
- определение глубины расположения центраторов и башмаков колонн;
- обнаружение дефектов колонн: трещин, коррозии, обрывов, механического износа буровым инструментом, геофизическими приборами, каротажным кабелем;
- определение мест негерметичности колонн, интервалов притока и поглощения флюида;
- определение мест расположения и количества перфорационных отверстий;
- определение интервалов с инородными отложениями и покрытиями на внутренней стенке колонны;

— определение мест напряженного состояния обсадной колонны или ее прихвата.

В разделе 3 «**Основы электромагнитной дефектоскопии**» задачи, стоящие перед электромагнитной дефектоскопией, условно разделены на две группы: определение толщины стенок колонн и выделение локальных дефектов с оценкой их параметров. Для определения толщины стенок колонн, в особенности в многоколонных конструкциях, более эффективен нестационарный режим измерений. Наиболее широкое применение при определении толщины в существующих дефектоскопах находят осевые зонды, генераторная и приемная катушки которых ориентированы по оси скважины.

По генераторной катушке пропускаются импульсы тока прямоугольной формы с паузой между ними, причем в приборах ЭМДС-ТМ-42 и ЭМДС-С, используются импульсы разной полярности. В момент паузы измеряется ЭДС на выходе измерительной катушки, пропорциональная производной магнитной индукции по времени. Величина измеряемого сигнала ε зависит от конструкции зонда и от параметров среды. Если зонд помещен в одну стальную колонну, то:

$$\varepsilon = f(\delta, \mu, \sigma, D, T),$$

где: δ — толщина стенки трубы; μ — магнитная проницаемость металла трубы; σ — удельная электропроводность металла; D — диаметр трубы; T — температура в скважине.

Основной задачей является определение толщины стенки δ , остальные параметры выступают в роли мешающих факторов. Температура в скважине не входит непосредственно в уравнения электромагнитного поля. Однако она влияет на величину магнитной проницаемости μ и электропроводности σ металла. Температура T в скважине может быть измерена скважинным термометром, который входит в состав аппаратуры ЭМДС-ТМ-42, и затем использована для введения поправок в значения μ и σ , определенные при нормальной температуре.

При этом условно считается, что температура металла труб близка к температуре флюида в скважине.

Диаметр труб D в расчетах полагается известным заранее. Дефектоскопы ЭМДС-ТМ-42 и ЭМДС-С не содержат блока профилемера. По величине сигнала можно только грубо оценить диаметр внутренней трубы, например, отличить НКТ от обсадной колонны. Практически общая конструкция скважины (количество и внешний диаметр труб, примерное положение башмаков колонн) всегда известна, а истинное положение башмаков колонн определяется дефектоскопом.

В разделе 4 «**Неустановившееся электромагнитное поле круговой петли в присутствии проводящей цилиндрической пленки Прайса-Шейнманна**» рассмотрено аналитическое решение задачи о возбуждении электромагнитного поля ступенчатым изменением тока, протекающим в круговой петлей, соосно расположенной с проводящей круговой цилиндрической пленкой.

Решение рассматриваемой задачи может иметь ряд технических приложений в том числе в разведочной и промысловой геофизике. Так, при электромагнитном каротаже методом переходных процессов, требуется учитывать влияние зоны проникновения бурового раствора, влияние собственно раствора вокруг измерительного снаряда, иногда влияние обсадных труб.

В горизонтально-слоистых разрезах становление поля над проводящей плоскостью является одним из опорных случаев, используемых в качестве основы при интерпретации и построении приближенных способов решения прямой задачи электроразведки. Цилиндрическая пленка Прайса-Шейнманна может играть соответствующую роль при изучении влияния цилиндрически-слоистых разрезов.

Для расчета неустановившегося поля выберем в качестве источника поля круговую петлю, магнитный момент которой совпадает с направлением оси цилиндра OZ . Примем также, что петля лежит в плоскости $z = 0$ и ее центр

находится в начале O прямоугольной системы координат x, y, z ; $a > b$, где a – радиус цилиндра, b – радиус петли.

До момента времени $t = 0$ в петле протекает постоянный ток силы J . При $t = 0$ магнитный момент $M = \pi b^2 J$ петли скачкообразно уменьшается до нуля, в результате чего на проводящей цилиндрической пленке возникают вихревые токи.

Введем круговую цилиндрическую систему координат r, φ, z , связанную с координатами x, y, z соотношениями

$$x = r \cos \varphi, \quad y = r \sin \varphi, \quad z = z,$$

где $0 \leq r < \infty$, $0 \leq \varphi < 2\pi$, $z = z$.

Нетрудно показать, что в квазистационарном приближении всюду вне проводящей пленки вектор-потенциал A удовлетворяет уравнению

$$\text{rot rot } A = 0, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума; $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака.

Напряженность E электрического поля и вектор B магнитной индукции связаны с вектором A соотношениями

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t}, \quad B = \text{rot } A. \quad (2)$$

Отсюда следует, что на цилиндрической пленке Σ вектор-потенциал A подчиняется начальному условию

$$A(a, \varphi, z, 0) = A_{\text{ист}}(a, \varphi, z), \quad (3)$$

условию ограниченности

$$|A| < \infty, \quad (4)$$

и краевым условиям

$$A_{\tau}^e = A_{\tau}^i, \quad (5)$$

$$\mathbf{n} \times \text{rot } A|_{\Sigma} = -\mu_0 S \frac{\partial A_{\tau}}{\partial t}, \quad (6)$$

где $A_{\text{ист}}(a, \varphi, z)$ – вектор потенциал, создаваемый на поверхности Σ постоянным током, протекающим в петле; $\mathbf{n}$ – единичная нормаль к поверхности Σ ; S –

удельная поверхностная проводимость пленки; A_τ – тангенциальная составляющая вектора A на поверхности Σ ; A_τ^e и A_τ^i – тангенциальные составляющие вектора A на поверхности Σ соответственно со стороны поверхности Σ , определяемой нормалью n , и с противоположной стороны поверхности Σ .

В силу аксиальной симметрии задачи вектор-потенциал A в системе координат r, φ, z имеет единственную отличную от нуля компоненту $A_\varphi(r, z, t)$, не зависящую от координаты φ . Отсюда эта компонента, как следует из выражений (1)-(6), удовлетворяет уравнению

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A_\varphi}{\partial r} \right) - \frac{A_\varphi}{r^2} + \frac{\partial^2 A_\varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (7)$$

единственные отличные от нуля компоненты E_φ , B_r и B_z векторов

электромагнитного поля E и B определяются равенствами,

$$E_\varphi = -\frac{\partial A_\varphi}{\partial t}, \quad B_r = -\frac{\partial A_\varphi}{\partial z}, \quad B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_\varphi), \quad (8)$$

компонента $A_\varphi(r, z, t)$ подчиняется начальному условию

$$A_\varphi(a, z, 0) = A_{\varphi_{\text{ист}}}(a, z), \quad (9)$$

условию ограниченности

$$|A_\varphi| < \infty, \quad (10)$$

и краевым условиям

$$A_{\varphi_\tau}^e = A_{\varphi_\tau}^i, \quad (11)$$

$$\frac{\partial A_\varphi^e}{\partial r} - \frac{\partial A_\varphi^i}{\partial r} = \mu_0 S \frac{\partial A_\varphi^e}{\partial t} \bigg|_{r=a}, \quad (12)$$

где A_φ^e и A_φ^i – компонента вектор потенциала вне и внутри цилиндра $r = a$.

Хорошо известно, что

$$A_{\Phi_{\text{ист}}}(a, z) = \mu_0 b J \pi^{-1} \int_0^{\infty} I_1(\lambda b) K_1(\lambda a) \cos \lambda z d\lambda. \quad (13)$$

Интегрируя уравнение (7) методом разделения переменных и учитывая условие (10), а также четность вектор-потенциала по координате z получаем

$$A_{\Phi}^e = \int_0^{\infty} C_e(\lambda, t) K_1(\lambda r) \cos \lambda z d\lambda, \quad (14)$$

$$A_{\Phi}^i = \int_0^{\infty} C_i(\lambda, t) I_1(\lambda r) \cos \lambda z d\lambda, \quad (15)$$

где $I_1(\lambda r)$ и $K_1(\lambda r)$ – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода соответственно.

Коэффициенты разложений C_e и C_i связаны граничным условием (11), а именно

$$C_e(\lambda, t) = C_i(\lambda, t) \frac{I_1(\lambda a)}{K_1(\lambda a)}. \quad (16)$$

Зависимость коэффициентов разложения C_e и C_i от времени t определяется из граничного условия (12):

$$C_e(\lambda, t) = c(\lambda) \frac{\exp\left[-\frac{t}{\mu_0 S a I_1(\lambda a) K_1(\lambda a)}\right]}{K_1(\lambda a)}, \quad (17)$$

$$C_i(\lambda, t) = c(\lambda) \frac{\exp\left[-\frac{t}{\mu_0 S a I_1(\lambda a) K_1(\lambda a)}\right]}{I_1(\lambda a)}. \quad (18)$$

Постоянная интегрирования по времени $c(\lambda)$ находится из условия (9) непрерывности вектор потенциала по времени на проводящей цилиндрической пленке. Следовательно,

$$c(\lambda) = \mu_0 b J \pi^{-1} I_1(\lambda b) K_1(\lambda a), \quad (19)$$

Таким образом,

$$A_{\Phi}^e = \mu_0 b J \pi^{-1} \int_0^{\infty} I_1(\lambda b) K_1(\lambda r) \exp\left[-\frac{t}{\mu_0 S a I_1(\lambda a) K_1(\lambda a)}\right] \cos \lambda z d\lambda, \quad (20)$$

$$A_{\phi}^i = \mu_0 b J \pi^{-1} \int_0^{\infty} \frac{I_1(\lambda b) K_1(\lambda a) I_1(\lambda r)}{I_1(\lambda a)} \exp\left[-\frac{t}{\mu_0 S a I_1(\lambda a) K_1(\lambda a)}\right] \cos \lambda z d\lambda. \quad (21)$$

Наконец, применяя формулы (8), находим выражения для компонент неустановившегося поля для случая $r \leq a$

$$E_{\phi}^i = \frac{b J \pi^{-1}}{a S} \int_0^{\infty} \frac{I_1(\lambda b) I_1(\lambda r)}{I_1^2(\lambda a)} \exp\left[-\frac{t}{\mu_0 S a I_1(\lambda a) K_1(\lambda a)}\right] \cos \lambda z d\lambda, \quad (22)$$

$$B_r^i = \mu_0 b J \pi^{-1} \int_0^{\infty} \frac{I_1(\lambda b) K_1(\lambda a) I_1(\lambda r)}{I_1(\lambda a)} \exp\left[-\frac{t}{\mu_0 S a I_1(\lambda a) K_1(\lambda a)}\right] \lambda \sin \lambda z d\lambda, \quad (23)$$

$$B_z^i = \mu_0 b J \pi^{-1} \int_0^{\infty} \frac{I_1(\lambda b) K_1(\lambda a) I_0(\lambda r)}{I_1(\lambda a)} \exp\left[-\frac{t}{\mu_0 S a I_1(\lambda a) K_1(\lambda a)}\right] \lambda \cos \lambda z d\lambda \quad (24)$$

и при $r > a$

$$E_{\phi}^e = \frac{b J \pi^{-1}}{a S} \int_0^{\infty} \frac{I_1(\lambda b) K_1(\lambda r)}{I_1(\lambda a) K_1(\lambda a)} \exp\left[-\frac{t}{\mu_0 S a I_1(\lambda a) K_1(\lambda a)}\right] \cos \lambda z d\lambda, \quad (25)$$

$$B_r^e = \mu_0 b J \pi^{-1} \int_0^{\infty} I_1(\lambda b) K_1(\lambda r) \exp\left[-\frac{t}{\mu_0 S a I_1(\lambda a) K_1(\lambda a)}\right] \lambda \sin \lambda z d\lambda, \quad (26)$$

$$B_z^e = -\mu_0 b J \pi^{-1} \int_0^{\infty} I_1(\lambda b) K_0(\lambda r) \exp\left[-\frac{t}{\mu_0 S a I_1(\lambda a) K_1(\lambda a)}\right] \lambda \cos \lambda z d\lambda. \quad (27)$$

Полученные выражения для компонент электромагнитного поля позволяют в достаточно общем виде исследовать влияние обсадных колонн на результаты индукционного каротажа скважин.

Заключение. В ходе выполнения настоящей бакалаврской работы получены следующие результаты:

1. Изучены причины возникновения дефектов обсадных колонн. К числу этих дефектов относятся коррозионные процессы и воздействия механических факторов на деформацию обсадных колонн.
2. Рассмотрен контроль технического состояния скважин, осуществляемый с помощью инклинометрии, кавернометрии, профилометрии, термометрии,

резистивиметрии, дебитометрии. Определены цели и задачи контроля технического состояния обсадных колонн геофизическими методами.

3. Изучены физические основы электромагнитной дефектоскопии. Рассмотрены осевые зонды, состоящие из генераторной и приемной катушек, ориентированных по оси скважины.
4. Получено аналитическое решение задачи о неустановившемся электромагнитном поле круговой петли в присутствии проводящей цилиндрической пленки Прайса-Шейнманна. Решение этой задачи может быть полезным для электромагнитной дефектоскопии обсадных колонн.

Таким образом, достигнута основная цель и выполнены все поставленные в бакалаврской работе задачи.