

ВЫСОКОЧАСТОТНОЕ
ИНДУКЦИОННОЕ
КАРОТАЖНОЕ
ИЗОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ
ЗОНДИРОВАНИЕ



НОВОСИБИРСК—1979

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

**ВЫСОКОЧАСТОТНОЕ
ИНДУКЦИОННОЕ
КАРОТАЖНОЕ
ИЗОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ
ЗОНДИРОВАНИЕ
(ВИКИЗ)**

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Составители

Ю.Н. Антонов, С.С. Жмаев

НОВОСИБИРСК—1979

Методические рекомендации посвящены обоснованию высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования (ВИКИЗ) для исследования разрезов скважин на нефть и газ — выявления пластов-коллекторов, изучения неоднородностей радиального градиента электропроводности по направлению от скважины в глубь пласта, определения истинного удельного сопротивления пласта и др.

Рассмотрены физические основы, методика и аппаратурные решения ВИКИЗ.

Работа предназначена для геофизиков и геологов, а также для специалистов, занимающихся электрическими измерениями в скважинах.

ВВЕДЕНИЕ

В программе "Сибирь" – естественном творении исторических решений XXV съезда – в одном из разделов, посвященном освоению природных ресурсов, большое внимание уделено геолого-геофизическим проблемам поиска, разведки и существенного прироста запасов и добычи нефти и газа – важнейшего энергетического сырья.

Решение этих задач не обходится без комплекса геофизических методов, позволяющих регистрировать в скважине в виде каротажной диаграммы различные физические параметры горных пород и другие характеристики, сопутствующие бурению. К первостепенным физическим параметрам горных пород осадочного комплекса, используемым в практике промысловой геофизики, относятся их электрические свойства: удельное электрическое сопротивление (УЭС) или удельная электропроводность, а также диэлектрическая проницаемость.

Если практика измерений УЭС горных пород в скважинах совершенствуется вот уже на протяжении более пятидесяти лет (начиная с 1926 года), то практическое использование диэлектрической проницаемости еще не вышло из стадии разработки методики, аппаратуры, изучения связей этого параметра с петрофизическими свойствами пород и поисков более оптимальных способов ее измерения.

Широко применяемое в промысловой геофизике боковое каротажное зондирование, комплексирование различных методов электрокаротажа, использующих физически разные способы фокусировки постоянного и переменного токов, разработка аппаратуры и метода переходных процессов – все это направлено на выделение в разрезе скважин пластов-коллекторов, изучение радиального градиента УЭС и др.

Среди множества модификаций электрокаротажа особое место занимает индукционный каротаж (ИК), в основу которого положено возбуждение электромагнитного поля на относительно низких частотах (20–50 кГц) и измерение фазовых компонент поля токов, индуцированных в исследуемой среде /3, 4, 22, 30/. Важными преимуществами этой модификации ИК перед методами постоянного то-

ка являются возможности измерения с высокой точностью малых УЭС горных пород (в пределах первых единиц Ом·м) в скважинах, заполненных "непроводящим" раствором или с относительно высоким УЭС.

Новейшими разработками метода постоянного тока с фокусировкой показана возможность успешного решения подобных задач в пластах относительно небольшой мощности.

Важным вкладом в развитие электромагнитных методов каротажа проводимости явились работы по теории, методике и аппаратуре, в основу которых положены измерения относительных характеристик /6/. Здесь, благодаря иной основе принципа фокусировки, использование очень высоких частот обеспечило возможность измерения кажущихся значений электропроводности и диэлектрической проницаемости пластов простейшими трехэлементными зондовыми установками. Вместе с тем, практика и теория показывают, что измеряемые характеристики поля как в традиционном ИК, так и в новых модификациях (ВИК, ДИК, ВКП, ВДК) индукционных методов каротажа зависят от изменений радиального градиента УЭС, электропроводности пласта и вмещающих пород. Эти ограничения ставят данные измерения в разряд качественных, если не вводить дополнительные сведения об изучаемом разрезе.

Вместе с тем, даже широко развитые методы измерения УЭС не всегда, особенно в условиях сложного геолого-геофизического разреза, удовлетворяют высоким требованиям определения подсчетных параметров, используемых для оценки запасов углеводородов; не в полной мере соответствуют высокой производительности буровых работ, занимают относительно много времени на проведение комплексного каротажа, в итоге страдают качество и эффективность исследований, увеличивается стоимость промышленных работ.

В этой связи, разработка способа зондирования пластов-коллекторов, с целью определения радиального градиента УЭС за одну спуско-подъемную операцию в скважине, представляет несомненный интерес.

Изопараметрическое возбуждение электромагнитного поля и регистрация его относительных характеристик открывают новые методические возможности изучения радиального градиента диэлектрической проницаемости горных пород. При этом характеристика поля, связанная с этим параметром, будет в значительной степени свободной от влияния электропроводности среды. В принципе, комплекс

изопараметрических зондов, рассматриваемых в данной работе, способны решать задачу по оценке диэлектрической проницаемости, по меньшей мере, в двух удаленных друг от друга точках среды по направлению в глубь пласта. Однако круг этих вопросов не входит в тему этой работы и будет рассмотрен отдельно.

В данных методических рекомендациях представлены исследования по обоснованию изопараметрического каротажного зондирования электропроводности пород. На основе математического моделирования обоснован выбор оптимальных параметров зондов, исследованы их радиальные и вертикальные характеристики, показана возможность восстановления радиального градиента УЭС. Рассмотрены аппаратные вопросы: а) возбуждения электромагнитного поля токами пяти различных частот с помощью соответствующих геометрически подобных зондов; б) измерения разности фаз в широком диапазоне УЭС пород; в) регистрации измеряемых величин в цифровом и аналоговом видах.

Исследования выполнены в Институте геологии и геофизики СО АН СССР при участии Сибирской геофизической экспедиции Миннефтепрома СССР.

Составители считают своим приятным долгом выразить признательность Н.Н.Пузыреву, Э.Э.Фотиади, К.А.Лебедеву, Н.А.Савостьянову, Л.П.Мехеду, Г.В.Ведерякову, Л.А.Табаровскому, В.Т.Чукину и другим товарищам, оказавшим помощь в организации разработок ВикиЗ а также благодарны С.М.Аксельроду, Л.А.Табаровскому за помощь и советы при анализе принципов ВикиЗ.

Большую помощь в осуществлении трудоемких расчетов оказали В.С.Кривоуцкий, В.П.Соколов и М.И.Эпов.

Пласты-коллекторы различного типа, содержащиеся в терригенных и карбонатных отложениях, в процессе бурения скважины с глинистым раствором на пресной воде подвергаются проникающему воздействию фильтрата бурового раствора. Проникновение фильтрата слабо минерализованной воды в коллекторы с высокой проницаемостью создает предпосылки к образованию радиального градиента (УЭС).

Рядом исследователей [1, 2] предложены схемы образования электрических неоднородностей в проницаемом пласте под воздействием гидродинамических сил, направленных от оси скважины в глубь пласта. Характерной особенностью этих схем является заметное различие в распределении удельного сопротивления в водоносных и нефтеносных пластах. Диагностическая ценность данного физического факта для задач промысловой геофизики до настоящего времени полностью не раскрыта и по некоторым характеристикам остается гипотетической из-за отсутствия надлежащих средств для измерения электрических неоднородностей непосредственно в скважинах.

В этой связи разработка метода электроразведки в скважинах, способного решать проблему восстановления действительной картины радиальной электрической неоднородности в пластах, представляется весьма актуальной.

1. СПОСОБЫ КАРТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАДИАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

Надежным способом выделения коллекторов по признаку радиального градиента между глинистой коркой на стенке скважины и промытой частью пласта являются измерения микроразведки. Вместе с тем, достоверность данных измерений в ряде случаев имеет ограничения. В частности, к ним относятся случаи образования большой толщины глинистой корки и др.

Из других электрических методов, способных выделить пласты-коллекторы по радиальному градиенту УЭС, широко используются в СССР результаты бокового картажного зондирования (БКЗ) с применением нескольких однотипных зондов различной длины. БКЗ позволяет получить кривые радиального зондирования УЭС, по данным которых устанавливается характер зоны проникновения повышающего или понижающего удельного сопротивления относительно не затронутого фильтратом пласта, его истинное УЭС.

Вместе с тем, методу БКЗ присущи известные /7, 8, 18/ недостатки в определении радиального градиента УЭС. К ним можно отнести случаи исследования тонких по напластованиям коллекторов; мощных пластов, в толще которых простираются высокоомные относительно пласта-коллектора прослои терригенных толщ, сложенных тонким переслаиванием песчаников и глин, имеющих различную электропроводность (эффект анизотропии); пластов-коллекторов с чрезвычайно глубоким проникновением фильтрата, создавшего обширную и однородную по УЭС промытую зону пласта.

Можно отметить двухзондовые методы определения наличия градиента сопротивления: двумя существенно различными по длине зондами БКЗ или фокусированными зондами БК - ИК, МБК - БК и т.п. Комбинирование фокусирующих методов дает ряд преимуществ по сравнению с зондами КС, которым свойственны отмеченные выше затруднения БКЗ.

Вместе с тем, результаты измерений удельного сопротивления пород (или их электропроводности) различными методами электрокаротажа (БКЗ, БК, ИК и т.д.) могут отличаться даже в однородной среде не только из-за электродинамического разнообразия источников возбуждения поля и физических особенностей распределения наведенных в среде токов, но и в силу технических затруднений в градуировке измеряемых величин простыми средствами эталонирования.

Методы индукционного каротажа положительно зарекомендованы в практике промысловой геофизики.

Широко известный индукционный каротаж /3, 4, 22, 30/, основанный на измерении безотносительных характеристик переменного магнитного поля токов, индуцированных в среде, обладает рядом достоинств. Наиболее существенными являются большая глубинность исследования, высокая чувствительность к пластам низкого удельного сопротивления и, в этой связи, четкое их выделение среди высокоомных пропластков.

Известны способы ИБКЗ, основанные на использовании нескольких зондов различной длины /9, 30/, характеризующиеся различной глубиностью исследования, с помощью которых можно установить наличие радиального градиента удельного сопротивления. При соответствующем комплексном подходе этими способами можно оценить удельное сопротивление пласта и зоны проникновения, полученное другими методами электрометрии, диаметр цилиндрической зоны проникно-

вения. При этом данные получают из предположения о существовании четких границ между электропроводностями пласта и зоны проникновения (модель среды с цилиндрическими границами раздела). Однако полученные такими методами сведения об удельном сопротивлении соответствуют обобщенным объемам исследуемой среды и не детализируются в соответствии со сложным характером распределения электропроводности в зоне проникновения пластов-коллекторов.

Для изучения радиальной неоднородности пластов с помощью двух геометрически идентичных двухкатушечных зондов с фиксированными расстояниями между возбуждающими и измерительными катушками, разнесенными одна относительно другой на некоторое расстояние, был предложен частотный способ индукционного каротажного зондирования /IО/. В указанном способе возбуждающие катушки зондов питают токами синхронно качающихся частот, девиация которых соответствует заданным пределам изменения радиуса исследования, при этом отношение коэффициентов усиления изменяют обратно пропорционально квадрату отношения качающихся частот, а регистрацию сигнала производят в функции времени девиации частот пропорционально радиусу слоя. Способ, обладая значительной глубиной исследования, не позволяет детально изучать зону проникновения.

Известен также геометрический способ индукционного каротажного зондирования /II/ для изучения радиальной неоднородности пластов-коллекторов с помощью зонда, содержащего возбуждающую катушку, питаемую током фиксированной частоты, и измерительные катушки, разнесенные относительно друг друга. В процессе радиального зондирования, когда зондовая система находится в статическом положении относительно исследуемого пласта, одну из катушек зонда приводят в движение относительно неподвижных катушек по направлению оси зонда. При этом регистрируют по меньшей мере одну относительную характеристику поля как функцию движения катушки. По этому же способу возможно передвижение одновременно с возбуждающей катушкой одной из двух измерительных катушек с сохранением отношения расстояний между измерительными элементами зонда и его общей длиной. Кроме того, движение (размещение) катушек зонда можно осуществлять дискретно через заданные интервалы длины. По результатам такого зондирования возможно выделение зон проникновения повышающего и понижающего характера, кольцевой зоны повышенной электропроводности. Однако индукционным способам

каротажа, основанным как на частотном /IО/, так и геометрическом зондировании /II/ радиальной неоднородности пласта, присущи общие недостатки: измеряемые характеристики магнитного поля в значительно большей степени зависят от изменения зондирующего параметра (частоты, длины зонда), чем от радиальных аномалий электропроводности, что, в конечном итоге, затрудняет интерпретацию результатов измерений.

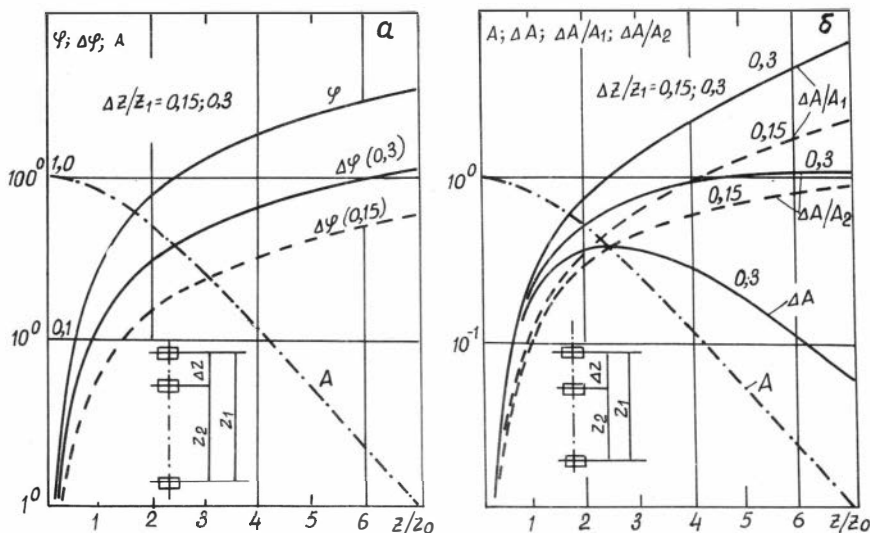


Рис.1

Графики на рис. I, а, б иллюстрируют зависимости абсолютных и относительных характеристик квазистационарного поля магнитного диполя (A – амплитуда, φ – фаза, $\Delta\varphi$ – разность фаз, ΔA – разность амплитуд с равными прямыми полями, $\Delta A/A_1$ – отношение разностной амплитуды к полному полю длинного зонда, $\Delta A/A_2$ – отношение разностной амплитуды к полному полю короткого зонда) от безразмерного параметра

$$z/z_0 = z \sqrt{\frac{\delta \mu \omega}{2}} = z \sqrt{f} \sqrt{\delta 4\pi^2 10^{-7}} \quad (I.I)$$

Здесь Z — длина зонда, Z_0 — толщина скин-слоя, определяемая частотой возбуждающего поля $f = \omega/2\pi$ и электропроводностью среды σ , $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$. Кроме того, на рисунках иллюстрируется зависимость относительных характеристик от относительных размеров измерительной базы ($\Delta Z/Z = 0,15$ и $0,30$).

Из рассмотрения графиков следует, что варьирование любого из параметров установки: длины зонда, частоты или измерительной базы, влечет за собой изменение величин измеряемых характеристик даже в однородной среде с постоянным значением электропроводности, поскольку характеристики магнитного поля на оси магнитного диполя являются функциями Z , f , ΔZ и σ (если токи проводимости преобладают над токами смещения и магнитная проницаемость пород принята равной проницаемости воздуха). Таким образом, ни геометрическое индукционное зондирование, выполненное по аналогии с БКЗ зондами разной длины, ни частотное зондирование, основанное на явлениях затухания поля в среде, не позволяют решать задачу оптимально, т.е. обеспечить неизменность измеряемой характеристики поля в однородной среде и обеспечить необходимую локальную чувствительность зондирующего параметра установки на наличие электрических неоднородностей в пласте. Как уже отмечалось, сам факт изменения измеряемой характеристики поля при вариации зондирующего параметра существенно затрудняет использование традиционных методов ИК для детального отображения в измеряемых характеристиках поля всей сложности радиального градиента электропроводности. Вместе с тем, нельзя не отметить высокие метрологические свойства высокочастотного индукционного каротажа, основанного на измерении как абсолютных характеристик поля (амплитуды, активной компоненты и т.п.), так и относительных (разность фаз, отношение амплитуд и т.п.). В последнем относительная простота технологии и метрологии трехэлементных зондовых устройств сопровождается улучшенными вертикальными и радиальными характеристиками, которые обеспечиваются благодаря использованию высоких частот возбуждающего поля (от сотен тысяч до десятка миллионов герц).

Таким образом, весь опыт разработок теории, методики и аппаратуры высокочастотных электромагнитных методов каротажа /5,6,31,32/ подготовил прочную основу для создания индукционного каротажного зондирования. Необходимость такой разработки

очевидна. ИБКЗ позволит изучать сложное строение электрических неоднородностей, образованных при движении фильтра бурового раствора в пласте-коллекторе и его взаимодействии с пластовыми флюидами, минералогическими частицами, газовыми включениями и т.п. По всей видимости, в пластах различного минералогического и флюидного состава, различной пористости и проницаемости можно ожидать заметного разнообразия в значениях удельных сопротивлений по направлению простирания пласта. Например, в случае, когда поровое пространство проницаемых песчано-глинистых пластов заполнено нефтью с заметными признаками пластовой воды, при проникновении слабоминерализованного фильтра бурового раствора в пласт, перед его фронтом может образоваться соосная скважине "кольцевая" зона повышенной электропроводности. Наличие такой зоны характерно, по-видимому, только для нефтегазовых пластов, и ее обнаружение и оценка по электрическим и геометрическим параметрам, несомненно, имеет большой практический интерес /22/.

Решение этих сложных задач, по сути являющихся обратными задачами, может быть реализовано на основе многозондового высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования. Разрабатываемая аппаратура ВИКИЗ обеспечивает регистрацию пяти каротажных кривых за одну спуско-подъемную операцию и скорости подъема при записи кривых - 2 км/час. При этом каждая из кривых соответствует различному радиусу исследования вокруг ствола скважины.

2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ЗОНДОВ ВИКИЗ

В случае квазистационарного электромагнитного поля в однородной изотропной среде для магнитного поля, представленного в долях прямого поля в воздухе, имеем:

$$h_z = e^{-\rho} (1 + \rho - i\rho) e^{i\rho} , \quad (2.1)$$

где $\rho = z/z_0$.

Откуда, амплитуда

$$A = e^{-\rho} \sqrt{(1 + \rho)^2 + \rho^2} , \quad (2.2)$$

фаза

$$\varphi = \rho - \operatorname{arctg} \frac{\rho}{1 + \rho} . \quad (2.3)$$

Для разности фаз, измеряемой трехэлементными зондами, имеет место следующее соотношение:

$$\Delta \varphi = \frac{Z_i}{Z_0} \frac{\Delta Z}{Z_i} - \operatorname{arctg} \frac{\frac{Z_i}{Z_0} \frac{\Delta Z}{Z_i}}{(1 + 2 \frac{Z_i}{Z_0})(1 - \frac{\Delta Z}{Z_0}) + 2(\frac{Z_i}{Z_0})^2} . \quad (2.4)^*$$

Принимая во внимание соотношение (1.1), можно установить из (2.1) неизменность поля в среде с фиксированными значениями электропроводности, если выполнить условия, при которых величина произведения длины зонда на частоту (в степени 1/2) будет постоянной в процессе изменения зондирующего параметра — длины зонда. В этом случае с уменьшением длины зонда частоту необходимо увеличивать и, наоборот, с увеличением длины зонда — частоту снижать. То же справедливо для амплитуды (2.2) и фазы (2.3). Таким образом, изопараметричность, т.е. постоянство некоторых обобщенных параметров, в данном случае произведения $Z_i \sqrt{f}$, позволяет сохранить неизменными величины абсолютных характеристик поля (амплитуду и фазу) в однородной изотропной среде с фиксированным значением электропроводности. Такая взаимокompенсация конструктивных параметров зонда позволяет обеспечить наряду с таким важным фактором, как зависимость измеряемой характеристики поля только от удельного сопротивления среды, концентрацию индуцированных токов в объеме среды, непосредственно примыкающей к зондовому устройству, что создает предпосылки к детальному восстановлению картины распределения электрических неоднородностей в зоне проникновения. Действительно, если с уменьшением длины зонда, как правило, глубинность исследования уменьшается, то одновременное повышение частоты, необходимое для сохранения постоянства величины $Z_i \sqrt{f}$, сопровождается известным физическим явлением уменьшения глубины проникновения индуцируемых в проводящей среде высокочастотных токов, что способствует большей концентрации их вблизи зондовой установки. Таким образом, перестройка глубинности исследования обеспечивается геометрическим разно-

*) за длину зонда Z_i принят максимальный размер трехэлементного зонда, состоящего из одной генераторной и двух измерительных катушек.

сом элементов зонда и скин-эффектом. С увеличением длины зонда возрастает вклад в измеряемые характеристики поля удаленных участков среды. Этот эффект усиливается за счет одновременного снижения частоты тока возбуждения, поскольку глубина проникновения индуцируемых в среде токов увеличивается и распределенные в среде токи охватывают все больший ее объем, снижая детальность исследования радиальных неоднородностей.

Отмеченные особенности изопараметрических установок были ранее предложены для использования в геоэлектроразведке [12]. Однако низкая производительность полевых работ, по-видимому, не позволяет широко реализовать изопараметрическое зондирование в электроразведке.

В задачах скважинной электрометрии, благодаря малым размерам и жесткой фиксации элементов зонда, подобных трудностей не возникает, и эффективность изучения радиальной неоднородности пластов-коллекторов становится физически обоснованной и реальной.

Из выражения для разности фаз (2.4) видно, что условия изопараметричности только одной величины $Z_i \sqrt{f_i}$ недостаточно для того, чтобы сохранить постоянство этой характеристики поля при изменении длины зонда (Z_i). Действительно, разность фаз остается неизменной только в том случае, если дополнительно обеспечить постоянным отношение размера базы к длине зонда — $\Delta Z_i / Z_i$. Необходимость выполнения этой операции можно показать и на рис. 1, а, б. Ось абсцисс на этих рисунках превращается в шкалу электропроводности, если произведение длины зонда на частоту в степени 1/2 постоянно. В этом случае, кривые с различным шифром (0,15; 0,30), обозначающим отношение размера базы к длине зонда, можно рассматривать (в точках пересечения их с вертикалью) как изменения соответствующих характеристик поля, вызванных изменением длины зонда, если размер базы положить неизменным. На приведенных графиках диапазон изменений по оси ординат соответствует двукратному изменению длины зонда. Таким образом, необходимая изопараметричность отношения размера базы к длине зонда, при изменении последней, очевидна.

Потребуется в выполнении третьего условия изопараметричности возникает в том случае, если в качестве интерпретируемой характеристики поля используют, например, отношение разностной

амплитуды к полной амплитуде одного из двухкатушечных зондов трехэлементного зонда. Модуль разностной амплитуды эдс, регистрируемый трехэлементным зондом с равными прямыми полями, можно записать, с учетом (2.1), в следующем виде:

$$|\Delta A| = \sqrt{(A_1 \sin \varphi_1 - A_2 \sin \varphi_2)^2 + (A_1 \cos \varphi_1 - A_2 \cos \varphi_2)^2} \quad (2.5)$$

При этом равенство индуцированных в измерительных катушках зонда эдс, обеспечивая предпосылки к компенсации сигналов от прямого магнитного поля простейшим способом, выполняется, если:

$$\frac{N_1}{z_1^3} = \frac{N_2}{z_2^3} \quad (2.6)$$

Здесь N_1 и N_2 - измерительные моменты, соответственно, удаленной и ближней измерительных катушек относительно генераторной.

Из выражения (2.6) вытекает третье условие изопараметричности:

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(1 - \frac{\Delta z}{z_1}\right)^3 = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^3 \quad (2.7)$$

которое хорошо известно в практике конструирования трехкатушечных фокусирующих зондов [5, 6].

Таким образом, изопараметричность обеспечивает постоянство измеряемых характеристик электромагнитного поля на оси магнитного диполя в однородной изотропной среде при изменении длины зонда как главного зондирующего параметра. При этом в общем случае произвольного выбора измеряемой характеристики поля все зонды ВИКИЗ должны обеспечивать единство следующих признаков:

1. Одноименные элементы зондов имеют геометрически подобное расположение (условие геометрической изопараметричности). Отношение расстояний между одноименными элементами любой пары зондов будем в дальнейшем называть коэффициентом подобия.

2. Отношение возбуждающих частот любой пары зондов обратно пропорционально квадрату их коэффициента подобия.

3. Отношение произведений моментов генераторной и измерительной катушек любой пары зондов равно кубу их коэффициента подобия. (Условие изопараметричности моментов).

В зависимости от измеряемых характеристик поля в ряде случаев бывает достаточно обеспечить лишь некоторые из перечисленных условий.

Так, например, при регистрации величин:

$$|h_{21} - h_{22}|, \quad \frac{|h_{21} - h_{22}|}{|h_{21}|}, \quad \frac{|h_{21} - h_{22}|}{|h_{22}|}$$

необходимо выполнение всех трех признаков электродинамического подобия. При измерении разности фаз достаточными являются первые два признака.

3. ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ ЗОНДОВ ВИКИЗ

Относительные характеристики поля, регистрируемые трехэлементным зондом, с тем большей интенсивностью реагируют на изменения электропроводности среды, чем выше частота, больше длина зонда и размер его базы. В этой связи вполне естественно установить оптимальные величины параметров зондовой установки ВИКИЗ.

Максимальное значение изопараметра $Z\sqrt{f}$ представляется, как уже отмечалось выше, наиболее целесообразным для локализации индуцируемых токов в ограниченном объеме среды. В этом случае появляется возможность детальной исследовать электропроводность в ближней зоне (промытая зона пласта и переходная зона с ее сложным характером строения и распределения электропроводности), благодаря максимальному проявлению скин-эффекта. Вместе с тем, выбор максимальной частоты ограничен тем, что возможно недопустимо большое влияние диэлектрической проницаемости среды на измеряемые характеристики поля.

Рассмотрим основные мотивы выбора максимальной частоты для изопараметрического индукционного каротажа, при которой влияние диэлектрической проницаемости можно не учитывать. Остановимся на трех характеристиках электромагнитного поля, представляющих перспективными для решения поставленной задачи – изучения электрической неоднородности пласта – разности фаз

$$\Delta\varphi = \varphi(Z_1) - \varphi(Z_2); \quad (3.1)$$

отношении аномалий амплитуды к суммарной амплитуде эдс, регистрируемой измерительной катушкой, наиболее удаленной от возбуждающей:

$$|\Delta A/A_1| = \frac{\sqrt{(A_1 \sin \varphi_1 - A_2 \sin \varphi_2)^2 + (A_1 \cos \varphi_1 - A_2 \cos \varphi_2)^2}}{A_1}; \quad (3.2)$$

отношении аномальной амплитуды к суммарной амплитуде эдс, регистрируемой измерительной катушкой, расположенной ближе к возбуждающей:

$$|\Delta A/A_2| = \frac{\sqrt{(A_1 \sin \varphi_1 - A_2 \sin \varphi_2)^2 + (A_1 \cos \varphi_1 - A_2 \cos \varphi_2)^2}}{A_2}; \quad (3.3)$$

а также рассмотрим традиционные для практики индукционного каротажа - разностную амплитуду (2.5) и активную и реактивную составляющие ЭДС.

В формулах (3.1) - (3.3) и (2.5) - фаза

$$\varphi(z_i) = \alpha z_i - \arctan \frac{\alpha z_i}{1 + \beta z_i}; \quad (3.4)$$

амплитуда

$$A(z_i) = e^{-\beta z_i} \sqrt{(1 + \beta z_i)^2 + \alpha^2 z_i^2}, \quad (3.5)$$

α и β - действительная и мнимая величины волнового числа

$\alpha + i\beta = \sqrt{\omega^2 \epsilon \mu + i\gamma \mu \omega}$, где ϵ - диэлектрическая проницаемость, равная $\epsilon^* \cdot 10^{-9}/36\pi [\Phi/M]$, ϵ^* - относительная диэлектрическая проницаемость, A - выражена в долях прямого поля в воздухе, равном $M/2\pi z_i^2$, M - магнитный момент генераторного диполя, равный $M_0 e^{-i\omega t}$ и $M_0 = n \cdot S \cdot j$, n - число витков, S - площадь витка, j - амплитуда тока.

Анализ указанных характеристик электромагнитного поля в зависимости от электрических параметров (σ и ϵ) среды и конструктивных признаков (z и ω) установки можно наглядно выполнить с помощью графиков на рис. 2, а, б, в. На этих рисунках характеристики поля (ось ординат) выражены через обобщенные величины: z/z_0 - длину зонда, приведенную к толщине скин-слоя (шифр кривых) и $\omega/\omega_0 = \omega \epsilon / \delta$ - отношение токов смещения к токам проводимости (ось абсцисс). Все графики на рисунках соответствуют фиксированному отношению измерительной базы к длине наибольшей пары трехэлементного зонда, равному 0,3. На каждом рисунке семейства кривых пересечены изолиниями (выполнены штрихами), численные обозначения которых (δ^2) определяют относительный вклад диэлектрической проницаемости в соответствующие характеристики /I3/. Из анализа кривых можно сделать следующие выводы: а) отношения токов смещения к токам проводимости, численные значения которых приведены на осях абсцисс, не определяют истинного ко-

личественного вклада токов смещения в соответствующие характеристики магнитного поля. Это наглядно иллюстрируется несовпадением изолинии $\delta^1 = 0,1$ с координатным значением $\omega/\omega_0 = 0,1$; б) разность фаз более чувствительна к диэлектрической постоянной, чем отношения амплитуд ($\Delta A/A_i$). Причем в большей степени это относится к случаю нормировки на амплитуду поля, регистрируемую наибольшим по длине зондом ($\Delta A/A_1$).

Анализ влияния размеров измерительной базы зондов показал, что относительный размер базы не оказывает влияния на вклад диэлектрической проницаемости в разность фаз и по разному влияет на отношения амплитуд $I/3$. В целом, из анализа формируется главный вывод: в задачах индукционного каротажа проводимости возможно применение более высоких частот, чем те, которые получают обычно из заданного 10–20% отношения токов смещения к токам проводимости. В частности, для характеристик поля, представленных на рис. 2, а, б, в, возможно расширение диапазона частот, по меньшей мере, в два, три и четыре раза, соответственно, что не приведет к повышению вклада токов смещения выше допустимого уровня ($\delta^1 \leq 0,1$).

Для решения методических и аппаратных вопросов представ — ляет интерес определить количественную связь обсуждаемых характеристик электромагнитного поля с конструктивными параметрами зондов (Z и f), с одной стороны, и электрическими параметрами среды (ρ и ϵ), с другой стороны. На рис. 2, г изображена графическая связь приведенной длины зонда ($0,03 \leq Z/Z_0 \leq 10$) с его абсолютным размером ($0,1 \leq Z \leq 2$), толщиной скин-слоя ($0,1 \leq Z_0 \leq 10$), частотой в мегагерцах ($0,02 \leq f \leq 50$) и удельным сопротивлением ($0,3 \leq \rho \leq 100$). Порядок пользования номограммой соответствует следующей последовательности по параметрам $Z/Z_0 \rightleftharpoons Z \rightleftharpoons Z_0 \rightleftharpoons f \rightleftharpoons \rho$. Прямая или обратная последовательность зависят от исходных данных. На рис. 2, д представлены графики для перехода от численных значений приведенной частоты ($1 \geq \omega/\omega_0 \geq 0,01$) к произведению удельного сопротивления на относительную диэлектрическую проницаемость ($3 \leq \rho \epsilon^* \leq 1000$) через частоту возбуждаемого поля в мегагерцах ($2 \leq f \leq 60$). Установив пределы изменений конструктивных признаков зондирующей установки и электрических параметров, с помощью графиков на рис. 2, г, д, легко определить

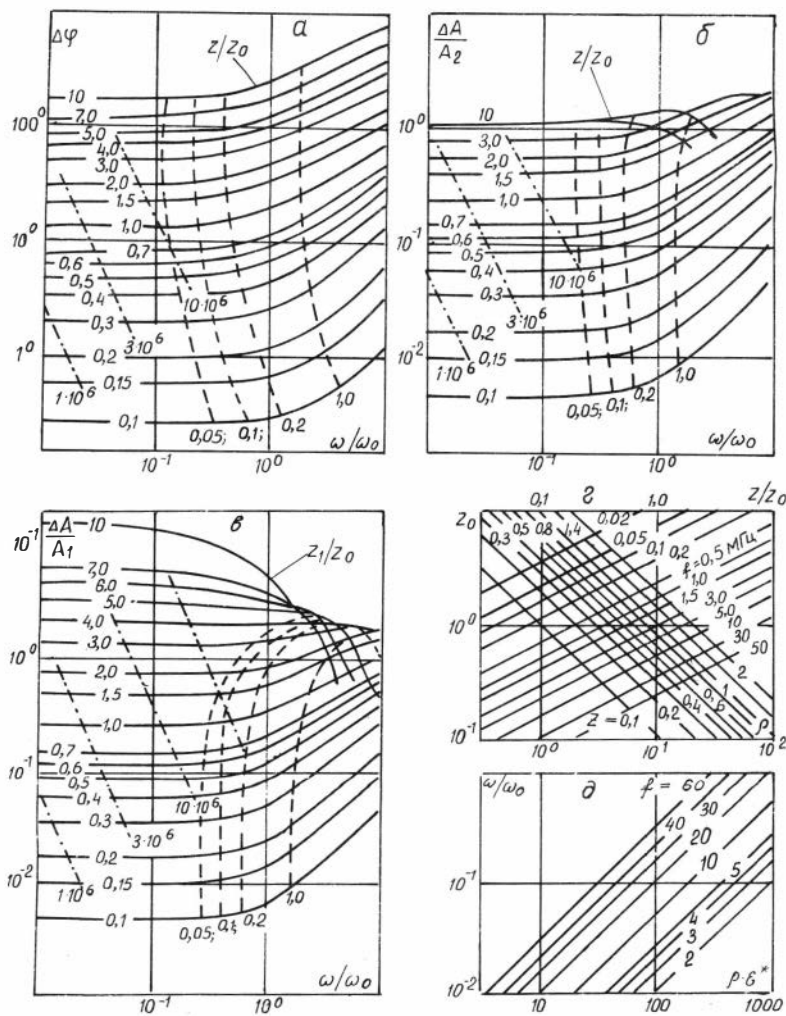


Рис. 2

местоположение линий рабочих частот (на рис. 2, а, б, в нанесены штрих-пунктирные линии для частот $1 \cdot 10^6$, $3 \cdot 10^6$ Гц), по которым, в частности можно выделить область индукционного каротажа проводимости, область диэлектрического индуктивного или волнового каротажа и промежуточную между ними область. Легко установить, что переход в область диэлектрического каротажа тем заметнее и сильнее, чем выше частота поля, при прочих равных условиях. В этой связи обоснование выбора максимальной частоты для решения задач по методу ВИГИЗ требует дополнительного рассмотрения.

Выбор максимальной частоты возбуждающего тока

Выбор максимальной частоты для изопараметрического зондового устройства устанавливают в соответствии с двумя условиями.

Первое условие определяется допустимым для соответствующей характеристики поля отношением токов смещения к токам проводимости, в котором значения удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости приняты максимально высокими с учетом реально возможного их сочетания в пластах. Такое сочетание характерно тем, что высокоомным терригенным пластам-коллекторам соответствуют низкие значения диэлектрической проницаемости, и наоборот, водоносные и заглинизированные коллекторы с малыми значениями удельного сопротивления имеют большую величину диэлектрической проницаемости. Реально существующий диапазон изменения диэлектрической проницаемости и электропроводности среды для большинства пород продуктивного комплекса терригенных отложений находится в пределах $4 < \epsilon^* < 40$ по данным полевых и лабораторных исследований [5, 6, 14, 15]. На основании этих данных ниже приводится схема по обоснованию выбора максимальной частоты для изопараметрической установки.

В таблице 3.1 даны значения частот (МГц) в зависимости от электрических параметров среды (ρ , ϵ^*). Частоты рассчитаны из условия, когда вклад от токов смещения в разность фаз составляет не более 10% ($\beta \approx 0,1$). Цифры в верхнем левом углу таблицы соответствуют наиболее вероятным сочетаниям диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления. Численные значения частот, расположенных между разделительными линиями и ниже, ближе к правому нижнему углу, соответствуют условиям мало-

вероятного сочетания в однородных пластах терригенного разреза.

Таблица 3.1.

$\rho \backslash \varepsilon^*$	6	8	10	12	14	16	20	25	30
10						29,2	23,4	18,7	15,6
15				26,0	22,3	19,5	15,6	<u>12,5</u>	<u>10,4</u>
20		29,2	23,4	19,5	16,7	<u>14,6</u>	<u>11,7</u>	9,36	7,8
30	26	19,5	15,6	<u>13,0</u>	<u>11,1</u>	9,75	7,8	<u>6,24</u>	<u>5,20</u>
40	19,5	14,6	<u>11,7</u>	9,75	8,36	7,31	<u>5,85</u>	4,68	3,90
50	15,6	<u>11,7</u>	9,36	7,80	6,68	<u>5,85</u>	4,68	3,74	3,12
60	13,0	9,75	<u>7,80</u>	<u>6,50</u>	<u>5,57</u>	4,80	3,90		
80	9,75	7,31	<u>5,85</u>	4,84	4,18	3,65			
100	7,80	<u>5,85</u>	4,68	3,90	3,34				
150	5,20	3,90	3,12	2,60					

В общем случае, оценка максимальной частоты для какой-либо относительной характеристики поля определяется из условия минимального значения ω/ω_0 , при котором вертикальная линия на рис. 2, а, б, в, смещаясь слева направо, касается соответствующей изолинии равного вклада токов смещения в данную характеристику поля. Например, для функции $\Delta A/A_1$ минимальное значение ω/ω_0 равно 0,4. Следовательно, задав реальное сочетание электрических параметров, определяют максимально допустимую частоту из соотношения $\omega\varepsilon/\delta = 0,4$.

Второе условие обоснования выбора максимальной частоты определяется допустимой величиной безразмерного параметра — отношения длины самого короткого зонда к толщине скин-слоя с самым низким удельным сопротивлением. Выбор такой допустимой величины этого параметра диктуется техническими возможностями измерения с заданной точностью малых амплитуд сигналов, наводимых в измерительных элементах зонда. Известно, что величина аномальных сигналов в сильной степени зависит от толщины скин-слоя (Z_0). При этом, чем меньше эта величина, тем в меньшем объеме среды вокруг возбуждающей катушки сконцентрированы токи, которые своим магнитным полем ослабляют прямое поле до уровня, составляющего пределы для точных измерений. Этот эффект наглядно иллюстрирует график амплитуды на рис.1. Если

принять возможным измерение сигналов, составляющих два процента от величины сигнала, возбуждаемого прямым магнитным полем генераторной катушки в воздухе, то для заданного уровня относительной амплитуды (0,02), в соответствии с графиком под шифром амплитуды на рис. 1, имеем максимальное значение приведенной длины зонда, равное 6. Для этой величины параметра в табл.3.2 приведены максимальные значения частот в зависимости от минимальных размеров зонда и удельного сопротивления, типичного для того или иного региона.

Таблица 3.2

$\rho_{\text{мин}} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}$ $z_{\text{мин}} \text{ (м)}$	0,3	0,4	0,5	0,6	1,0
0,5	10,9	14,6	18,2	21,9	36,5
0,6	7,59	10,1	12,6	15,2	25,3
0,7	5,58	7,44	9,30	11,2	18,6
0,8	4,27	5,69	7,12	8,54	14,2

Отметим, что частота, определяемая по второму условию выбора максимальной частоты, не должна превышать тех ее значений, которые установлены в соответствии с первым условием. При сопоставлении частот, приведенных в табл.3.1 и 3.2, можно заключить, что изучение относительно низкоомных разрезов, например, до 20 Ом·м, можно проводить с использованием частот порядка $10 \cdot 10^6$ Гц. В условиях песчано-глинистых пластов ряда регионов, имеющих удельное сопротивление пластов-коллекторов в зоне повышающего проникновения не более 10-12 Ом·м, максимальная частота для короткого зонда изопараметрической установки может быть более высокой: $(15 + 20) \cdot 10^6$ Гц.

Выбор "короткого" зонда

Выбор наименьшего по длине зонда в зондирующей установке определяется максимальным диаметром скважины, в которой можно эффективно использовать короткий зонд. Как известно [6], благодаря измерению относительных характеристик магнитного поля, резуль-

таты измерений не зависят от параметров скважины, если минимальная длина зонда примерно в 3 раза превышает диаметр скважины. Наиболее часто встречающийся размер диаметра скважины равен 0,2 м. С учетом этой величины минимальную длину зонда изопараметрической установки следует установить в пределах $0,5 + 0,7$ м. Более точное обоснование к выбору размера короткого зонда будет выполнено на основе анализа расчетов электромагнитных характеристик поля в сложных моделях сред (скважина-пласт; зонд, смещенный к стенке скважины и др.).

Электрические параметры среды и "максимальный" изопараметр

Резюмируя предварительное обоснование выбора максимальной частоты и минимальной длины зонда, можно установить среднее значение первой изопараметрической величины $z\sqrt{f} = 2 \cdot 10^3$. Выбор этой величины изопараметра и приведенной длины зонда $z/z_0 = 6$ предопределяет нижний предел удельного сопротивления среды ($\approx 0,5$ Ом·м). Естественно, если расширить динамический диапазон измерений относительной амплитуды магнитного поля (рис. 1) в область таких значений, величины которых меньше двух процентов, то при заданном изопараметре, возможно изучать еще более низкоомные пласты. С другой стороны, меньшей величине изопараметра $z\sqrt{f}$ сопутствует ослабленная связь измеряемых характеристик поля с электропроводностью среды в высокоомных пластах. Поэтому обоснование для конкретных геолого-геофизических районов максимальных значений главного изопараметра и разработка измерительных устройств с высокой чувствительностью к аномальным изменениям магнитного поля являются предпосылками для оптимизации исследований электрических неоднородностей в более широком интервале изменений электропроводности.

Анализ графиков на рис. 2 а,б,в, ограниченных справа изолинией $\delta^1 \leq 0,1$, позволяет определить следующие ограничения:

а) для разности фаз допускаются следующие максимальные произведения электрических параметров среды:

z/z_0	$6,0 \pm 1,0$	0,5	0,3	0,2	f
ρ_{ε}^*	$\frac{3,6 \cdot 10^3}{f}$	$\frac{4,7 \cdot 10^3}{f}$	$\frac{5,8 \cdot 10^3}{f}$	$\frac{7,2 \cdot 10^3}{f}$	МГц

б) для отношения разностной амплитуды к суммарной амплитуде поля короткого зонда ($0,2 \leq z/z_0 \leq 6$):

$$\rho_{\varepsilon}^* = \frac{5,75 \cdot 10^3}{f};$$

в) для отношения разностной амплитуды к суммарной амплитуде поля большого зонда:

z/z_0	5	4	3	2	1,5	1,0	f
ρ_{ε}^*	$\frac{54 \cdot 10^3}{f}$	$\frac{39 \cdot 10^3}{f}$	$\frac{22 \cdot 10^3}{f}$	$\frac{12 \cdot 10^3}{f}$	$\frac{9 \cdot 10^3}{f}$	$\frac{7 \cdot 10^3}{f}$	МГц

Принцип равенства измеряемой характеристики поля для зондов различной длины в системе ВИКИЗ определяет следующую связь:

$$z_1 \sqrt{f_1} = z_2 \sqrt{f_2} \quad (3.6)$$

При установленном интервале длин зондов z_{min} и z_{max} диапазон частот $f_{max} \div f_{min}$ позволяет определить граничные значения отношений токов смещения к токам проводимости с помощью выше установленных ограничений на величину ρ_{ε}^* .

$$\left. \begin{aligned} (\omega/\omega_0)_{min} &= \rho_{\varepsilon}^* f_{min} \frac{10^{-9}}{18} \\ (\omega/\omega_0)_{max} &= \rho_{\varepsilon}^* f_{max} \frac{10^{-9}}{18} \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

В качестве примера на поле графиков зависимости (рис. 3) разности фаз ($\Delta z/z = 0,15$) от обобщенных параметров ω/ω_0 (ось абсцисс) и z/z_0 (шифр кривых) нанесены штриховые линии для зондовой системы с величиной $z\sqrt{f} = 2 \cdot 10^3$. Кривые с различными произведениями ρ_{ε}^* (параллельные кривым z/z_0) пересечены тремя линиями, соответствующими различным частотам зо-

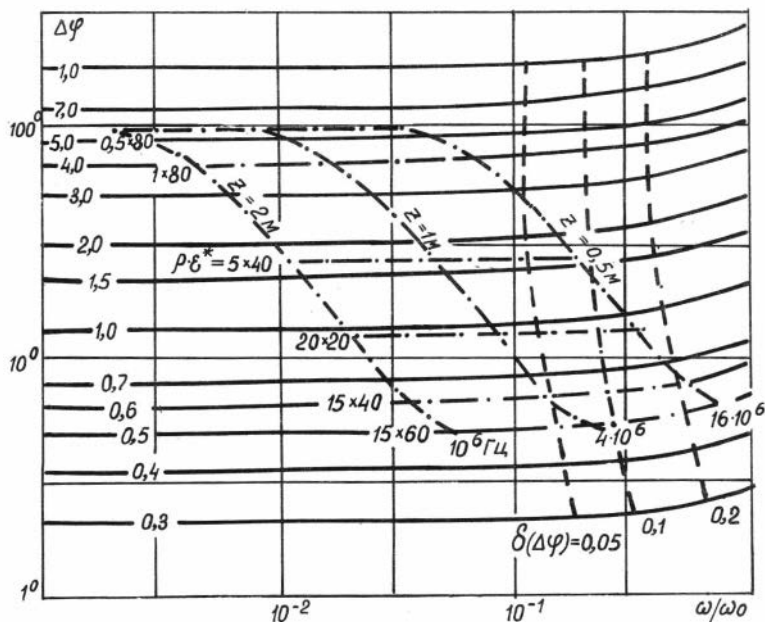


Рис. 3

ндовой установки ($1 \cdot 10^6$, $4 \cdot 10^6$ и $16 \cdot 10^6$ Гц). Измерение разности фаз, как видно из рисунка, при длинах зондов, превышающих 0,7 м, делает их зависящими только от электропроводности среды ($0,1$) вплоть до значений $\rho\epsilon^* = 900$. Для зондов, меньших 0,7 м, попадающих в область поля графиков ($\rho\epsilon^*$ и z/λ) справа от изолинии $\delta = 0,1$ влияние диэлектрической проницаемости будет оценено по результатам расчета электромагнитных полей в трехслойной цилиндрически-слоистой модели. Можно предполагать, что в пластах с повышением проникновения удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости (нефтеносный пласт) вклад электрических параметров зоны проникновения в измеряемую характеристику в большей мере определится электропроводностью переходной зоны пласта.

Принцип геометрического подобия зондов обеспечивается равенством отношений длин между одноименными катушками одностипных зондов.

Примем для самого короткого трехэлементного зонда, входящего в многозондовую систему изопараметрического индукционного каротажа, следующие обозначения: z_1 - длинный двухкатушечный зонд, z_2 - короткий двухкатушечный зонд, $\Delta z = z_1 - z_2$ - размер измерительной базы. Тогда для i -го зонда z_{1i} - длинный зонд, z_{2i} - короткий зонд, $\Delta z_i = z_{1i} - z_{2i}$ - база зонда.

Следовательно, $z_{2i}/z_{1i} = 1 - \frac{\Delta z_i}{z_{1i}}$ - коэффициент подобия зондов ВИКИЗ.

При смещении возбуждающей катушки из положения z на некоторое расстояние y , получим для этого трехэлементного зонда следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= z_1 + y \\ z_2 &= z_1 + y - (\Delta z + x) \\ \Delta z &= \Delta z + x \end{aligned} \right\}$$

где $xy = \Delta z/z_1 \cdot y$ - приращение размера базы.

При дискретном смещении возбуждающей катушки на равные друг от друга расстояния ℓ получим для любого i -го трехэлементного зонда следующие соотношения:

$$\begin{aligned} z_{1i} &= z_1 + (i-1)\ell \\ z_{2i} &= z_1 + (i-1)\ell - (\Delta z + x_i) \end{aligned}$$

Здесь $x_i = \frac{\Delta z}{z_{1i}}(i-1)\ell$ - необходимое приращение базы i -го зонда.

Таким образом, при увеличении длины зонда путем дискретного смещения возбуждающей катушки на равные расстояния ℓ , одна из измерительных катушек, например, образующая с возбуждающей катушкой короткий зонд, смещается в направлении возбуждающей катушки так же на равные и пропорциональные ℓ и $\Delta z/z_1$ расстояния. Здесь обратим внимание на одну из особенностей разности фаз, характерную для квазистационарного условия ее регистрации ($\partial(\Delta \varphi) \leq 0,1$). В соответствии с выражением (2.4) нетрудно показать, что при $\Delta z/z_1 \leq 0,3$ и $z_1/z_0 > 2$ трансцендентный член разности становится пренебрежимо малым ($\leq 5\%$) по сравнению с главным членом разности фаз - $\Delta z/z_0$ (ниже эти зако-

номерности рассмотрены подробно). Следовательно, в этом случае разность фаз определяется отношением длины измерительной базы зонда к толщине скин-слоя, и условия частотной изопараметричности зондовой системы можно обеспечить постоянством произведения длины соответствующей измерительной базы на частоту возбуждающего поля в степени $1/2$. При этом положение возбуждающей катушки зонда относительно измерительных может быть произвольным в рамках $6 > Z_1/Z_0 > 2$. В этом случае исследование электрической неоднородности можно выполнить путем изменения расстояния между измерительными катушками трехэлементного зонда. Вероятно, радиальная разрешающая способность исследования при таком способе зондирования неоднородностей будет лучше.

Условие изопараметричности магнитных моментов

Условия изопараметричности магнитных моментов предусматривают, как уже отмечалось, равенство отношения произведений магнитных моментов генераторной и измерительной катушек трехкатушечного зонда кубу коэффициента подобия:

$$\frac{M_{2i}}{M_{1i}} = \left(\frac{Z_{2i}}{Z_{1i}} \right)^3. \quad (3.8)$$

Это условие известно в задачах индукционного каротажа при компенсации прямого поля в воздухе, автоматически обеспечивающее фокусирующие свойства зонда относительно скважины и прилегающих к ней участков среды.

По принципу взаимности этих зондов возможно обеспечить такие же характеристики зонда, если в качестве возбуждающего элемента использована одна из катушек 3-элементного зонда, а два другие измерительные элементы выполняют с моментами, которые обеспечивают равенство индуцированных в них токов (эдс), и, следовательно, условие пропорциональности моментов совпадает с (3.8):

$$\frac{N_{2i}}{N_{1i}} = \left(\frac{Z_{2i}}{Z_{1i}} \right)^3 = \left(1 - \frac{\Delta Z_i}{Z_{1i}} \right)^3. \quad (3.9)$$

Как следует из (3.9), численное значение разности фаз, при прочих равных условиях, определяется величиной $\Delta z_i = z_{1i} - z_{2i}$. Данные табл. 3.3 иллюстрируют зависимость $\Delta \varphi$ от Δz_i ($z_{1i} = \text{const}$) для нескольких значений z/ρ .

Таблица 3.3

$\Delta z/z_1$ z/ρ	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4
3	0,288	0,448	0,572	0,852	1,128
1	0,080	0,117	0,155	0,227	0,295
0,5	0,0292	0,043	0,057	0,082	0,105

Из таблицы видна пропорциональная зависимость разности фаз от размеров базы. Например, увеличение Δz в два раза приводит к такому же увеличению $\Delta \varphi$ (несовпадение в пределах 2-4%). При увеличении в четыре раза ошибка в приросте не превышает 10%.

Для i -го трехэлементного зонда, при смещении возбуждающей катушки на равные дискретные расстояния ℓ , условие равенства индуцируемых в измерительных катушках токов прямым полем в воздухе выполняется при следующем соотношении:

$$\frac{N_{2i}}{N_{1i}} = \left[1 - \frac{\Delta z + \frac{\Delta z}{z_{1i}} (i-1) \ell}{z_{1i} + (i-1) \ell} \right]^3 \quad (3.10)$$

Следовательно, для обеспечения третьего условия изопараметричности зондовой системы достаточно сохранить отношение моментов измерительных катушек неизменным, если последние будут расположены на расчетном расстоянии, в соответствии с (3.9) или (3.10). Здесь только отметим, что в случае регистрации магнитных полей на разных частотах с помощью одной пары или многих пар измерительных катушек, последние должны быть изготовлены с учетом оптимального выбора индуктивности и добротности /5/. Так, например, максимальная электрическая добротность катушки и ее более высокая собственная резонансная частота, по сравнению с максимальной рабочей частотой зондового устройства, обеспечивают большую стабильность измеряемых характеристик поля.

4. ВЛИЯНИЕ СКВАЖИНЫ НА ЗОНДЫ БЛИЗИ

Физические основы высокочастотной "фокусировки"

Асимптотическое выражение для магнитной составляющей поля на оси магнитного диполя и скважины /6/.

$$h_z = A(k_1 a_c) e^{i\varphi(k_1 a_c)} A^{одн}(k_2 z) e^{i\varphi(k_2 z)}. \quad (4.1)$$

Это выражение, справедливое при условии, когда длина зонда значительно превышает радиус скважины ($z \gg a_c$) и проводимость бурового раствора выше электропроводности пласта ($\sigma_c \gg \sigma_n$) $\equiv (k_1 \gg k_2)$, физически прозрачно объясняет сущность фокусировки при регистрации относительных характеристик.

Действительно, первый множитель в (4.1) не зависит от длины зонда и целиком определяется параметрами скважины. Поэтому отношение амплитуд, регистрируемое зондами различной длины (z_1 и z_2), можно представить в виде:

$$\frac{h_{z_1}}{h_{z_2}} = \frac{A^{одн}(k_2 z_1) e^{i\varphi(k_2 z_1)}}{A^{одн}(k_2 z_2) e^{i\varphi(k_2 z_2)}}. \quad (4.2)$$

Очевидно, что эта величина не зависит от параметров скважины. Такой же вывод будет справедлив для отношений $\frac{AA}{A_1}$ и $\frac{AA}{A_2}$.

Из (4.1) фаза, обусловленная параметрами скважины,

$$\varphi_a = \varphi(k_1, a_c)$$

и фаза, обусловленная параметрам пласта и длине зонда,

$$\varphi_z = \varphi(k_2, z).$$

Разность между фазами сигналов, регистрируемыми зондами двух различных длин, если сохраняется условие $z_1 \gg a_c$ и $z_2 \gg a_c$, не зависит от параметров скважины:

$$\Delta\varphi = (\varphi_a + \varphi_{z_1}) - (\varphi_a + \varphi_{z_2}) = \varphi_{z_1} - \varphi_{z_2}.$$

Индукционное изопараметрическое зондирование, выполняемое путем изменения параметров трехэлементных зондов ($z, \Delta z$ и f), позволит с наибольшей полнотой отразить картину распределения неоднородностей в окружающем скважину объеме среды, если вклад параметров скважины (ρ_c, a_c) в результате измерений будет пренебрежимо малым или заведомо определенным.

Этот вклад скважины, в той или иной мере, в зависимости от характеристики поля, длины зонда и параметров скважины, будет

искажать форму кривой радиального зондирования. Поэтому получить четкое представление о радиальном распределении УЭС в "промытой" зоне, затем зоне проникновения, с ее особенностями в виде "кольцевых" электрических неоднородностей на пути к истинному УЭС пласта, возможно только после тщательного изучения всех "осложнений", вызываемых скважиной. Таким образом, исследование различных характеристик электромагнитного поля на моделях двухслойной цилиндрически-слоистой среды (скважина-пласт) необходимо для обоснования длины коротких зондов устройств ИИ-КИЗ и установления ограничений на величину отношения электропроводности скважины и пласта. Это отношение имеет особое значение для зондов "средних" размеров. Ниже будет пояснено, почему для зондов "средней" длины ($0,8 + 1$ м) необходимо обратить внимание при обосновании максимальной величины ρ_n/ρ_c .

Моделирование зондов в двухслойной цилиндрически-слоистой среде

Моделирование скважины выполнено по строгим формулам, численным интегрированием вертикальной составляющей магнитного поля магнитного диполя $/I_6/$.

$$h_z = h_{z0} - \frac{z^3}{\pi} \int_0^\infty \lambda_1^2 C_1 \cos \lambda_1 z d\lambda_1. \quad (4.3)$$

Для исследования вычислялись следующие величины: модуль (амплитуда) и аргумент (фаза) магнитного поля $-/h_z/$ и φ ; модуль разности амплитуд магнитных полей двух зондов различной длины с равными прямыми полями в воздухе $-/\Delta A/ = /h_{z1} - h_{z2}/$, разность фаз $-\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, а также относительные характеристики

$$\frac{\Delta A}{A_1} = \frac{|h_{z1} - h_{z2}|}{|h_{z1}|} \quad \text{и} \quad \frac{\Delta A}{A_2} = \frac{|h_{z1} - h_{z2}|}{|h_{z2}|}.$$

Параметры двухслойной модели задавались следующими относительными значениями:

$$z_1/z_n = z_1/\delta_n = 0,25; \quad 0,5; \quad 1,0; \quad 1,5; \quad 2; \quad 3; \quad 4; \quad 6.$$

$$z/\alpha_c = 2, \quad 3, \quad 4, \quad 5, \quad 6, \quad 8, \quad 10, \quad 14, \quad 18, \quad 24.$$

$$\rho_n/\rho_c = 2, \quad 4, \quad 8, \quad 16, \quad 32, \quad 64, \quad 128, \quad 256, \quad 512.$$

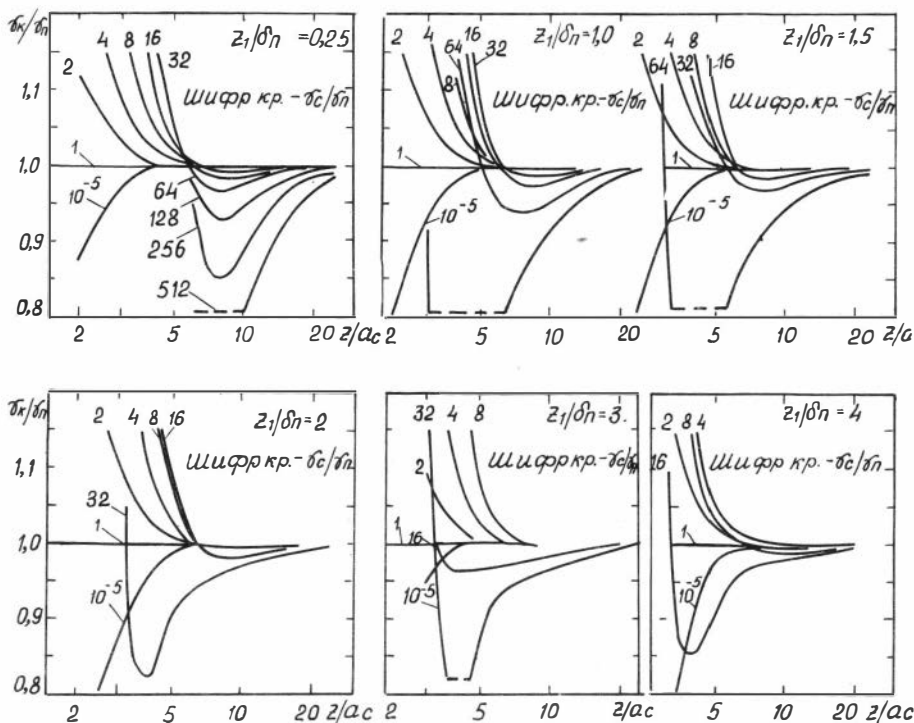


Рис. 4

В качестве примера на рис. 4 приведены графики зависимости $\Delta\varphi_H/\Delta\varphi_0 = \Delta\varphi_H/\Delta\varphi_0$ от z/a_c , шифр которых соответствует отношению δ_c/δ_H . Семейства графиков отличаются относительной величиной z_1/δ_H . Сразу отметим, что для других относительных характеристик поля влияние скважины проявляется аналогично разности фаз, если рассматриваются одни и те же условия на параметры среды и установки.

При анализе можно выделить для каждого семейства кривых (z_1/δ_H) три области характерных изменений измеряемого параметра в зависимости от относительной длины зонда.

Первая область соответствует малым длинам зондов и большим диаметрам скважины ($z/\sigma_c < 5$). В этой области графиков разность фаз в значительной степени подвержена влиянию параметров скважины и тем заметнее, чем больше величина ρ_n/ρ_c , при $z/\delta_n = \text{const}$. Наиболее четко эта область выделяется для относительно малых величин главного изопараметра (z/\sqrt{f}) или повышенного значения удельного сопротивления пласта и относится к семействам, модуль которых $z/\delta_n \ll 1,5$. Для этих семейств графиков границей первой области являются значения $4,5 < z/\sigma < 5,5$ на уровне 3–5%-го отличия $\delta_k/\delta_n = \Delta\varphi_n/\Delta\varphi_o$. При этом большинство кривых соответствует значениям $\delta_k = \delta_n$ и измеряемая характеристика поля становится такой же, как в однородной среде с УЭС пласта. Для семейства кривых с $z/\delta_n > 1,5$ первая область не имеет четкой границы для большинства кривых.

Вторая область характерна для всех семейств кривых со средними величинами приведенной длины зонда и соответствует $z/\sigma > 6,5$. В этой области измеряемая характеристика поля имеет минимумы на кривых ρ_n/ρ_c , которые достигают наименьших значений при $z/\sigma \approx 8$. При увеличении приведенной длины зонда (z/δ_n) минимумы смещаются в сторону меньших длин зондов.

Третья область, начиная со значений $z/\sigma > 8$, соответствует плавному переходу $\Delta\varphi_n$ к показаниям в однородной среде — $\Delta\varphi_o$, величина которой соответствует электропроводности пласта.

Анализ относительных характеристик поля, $|\Delta A/A_1|$ и $|\Delta A/A_2|$, в той же функциональной зависимости, что и для разности фаз, показал их полное совпадение, если $\delta_k/\delta_n = |\Delta A/A_i|^{i \text{ "еод."}} / |\Delta A/A_i|^{i \text{ "одн."}}$ ($i = 1$ или 2).

Модуль разности амплитуд $|\Delta A|$, как показали расчеты, в значительно большей степени осложняется параметрами скважины. Одинаковые значения этой характеристики могут соответствовать различным сочетаниям УЭС скважины и пласта.

Рассмотренные семейства кривых, представленные через обобщенный параметр z/δ_n , охватывают все многообразие возможных комбинаций параметров зондов ($z, f, \Delta z$), характеристик скважины (ρ_c и a_c) и пласта (ρ_n). Эти же результаты расчетов позволяют выполнить анализ влияния скважины для конкретных значений изопараметров ($z/\sqrt{f} = \text{const}$, $\Delta z/z = \text{const}$). Осуществить

это можно путем оцифровки кривых в соответствии с заданными значениями изопараметров. В качестве примера, в табл. 4.1 приведены значения ρ_n и ρ_c для различных приведенных к толщине скин-слоя длин зондов (z_1/δ_n) при фиксированных значениях изопараметров $z\sqrt{f} = 2 \cdot 10^3$ и $\Delta z/z = 0,3$. Величина изопараметра $z\sqrt{f}$ представлена приближенным равенством ввиду округления значений ρ_n .

Таблица 4.1

z_1/δ_n	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0
ρ_n	256	64	16	7	4	2	1
ρ_n/ρ_c	ρ_c (Ом·м)						
0	10^5	10^5	10^5	10^5	10^5	10^5	10^5
2	128	32	8	4	2	1	0,5
4	64	16	4	2	1	0,5	0,25
8	32	8	2	1	0,5	0,25	0,125
16	16	4	1	0,5	0,25	0,125	0,062
32	8	2	0,5	0,25	0,125	0,062	-
64	4	1	0,25	0,125	-	-	-
128	2	0,5	0,125	-	-	-	-
256	1	0,25	-	-	-	-	-
512	0,5	0,125	-	-	-	-	-

В соответствии с таблицей 4.1 и данными расчетов в двухслойной цилиндрически-слоистой среде, на рис.5 приведены кривые зависимости разности фаз от приведенной к радиусу скважины длины зондов ($z\sqrt{f} = 2 \cdot 10^3$) для различных значений удельного сопротивления однородной среды (сплошная горизонтальная линия) и модели "скважина-пласт" (штриховые линии). Здесь можно выделить две особенности в поведении разности фаз в зависимости от удельного сопротивления скважины.

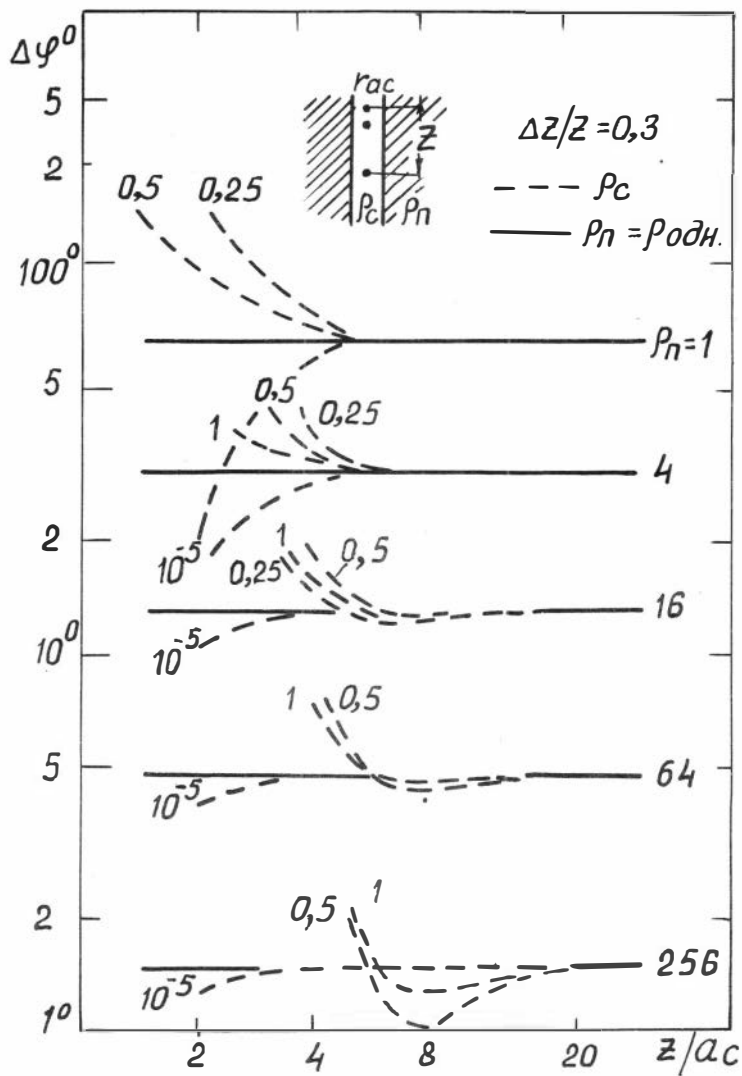


Рис. 5

Скважина с буровым раствором на нефтяной основе
(раствор, "не проводящий" электроток)

Влияние "непроводящей" скважины проявляется в том, что относительные характеристики поля стремятся к нулю с уменьшением z/a_c . Поэтому с увеличением длины зонда показания возрастают, стремясь к асимптотическим значениям, соответствующим удельному электрическому сопротивлению однородной среды с электропроводностью пласта. Можно отметить следующие свойства относительных характеристик поля:

1) в широком диапазоне УЭС ($256 + 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) влияние скважины мало, если длина зонда в два раза превышает ее диаметр;

2) чем меньше УЭС пласта, т.е. чем контрастнее перепад УЭС "скважина-пласт", тем при больших длинах зонда обеспечивается ослабление влияния "непроводящей" скважины. Так, например, доля сигнала от скважины не превышает пяти процентов, если $\rho_n = 256 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $z/a = 3$ или $\rho_n = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $z/a = 4$.

Скважина с низкоомным буровым раствором относительно
удельного электрического сопротивления пласта

В этом случае зависимость относительных характеристик поля от изменений длины зондов имеет ряд особенностей. Так, например, при относительно малых длинах зонда ($z/a \leq 5$) относительные характеристики стремятся к показаниям, соответствующим однородной среде с параметрами скважины. В этой области длин зондов на примере разности фаз можно отметить следующее. При $\rho_n < 4 + 5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, разность фаз тем чувствительнее к уменьшению z/a , чем меньше ρ_c (кривые с $\rho_c \leq 0,25 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ более круто поднимаются от линии $\rho_n = \rho_{одн.}$, начиная с $z/a \leq 5$). В этих условиях влияние параметров скважины особенно велико, становясь тем значительнее, чем больше удельное сопротивление пласта. Так, при $\rho_n \geq 7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, кривая с шифром $\rho_c = 0,25 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ располагается между кривыми с $\rho_c = 0,5$ и $\rho_c = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. При этом влияние такой низкоомной скважины начинает проявляться в "провисании" кривых в интервале средних длин зондов ($7 < z/a < 11$). "Провисание" кривой характеризуется уменьшением измеряемой характеристики поля по отношению к однородной среде с удельным сопро-

тивлением пласта и имеет наиболее глубокий минимум при $z/\alpha \approx 8$. В условиях более высокой контрастности ρ_n/ρ_c (например, когда $\rho_n = 256 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $\rho_c = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) "провисание" кривых достигает наибольших отклонений. Однако при этом, несмотря на значительную величину отношений $\rho_n/\rho_c \geq 500$, разность фаз уменьшается только на 30% относительно показаний в однородной среде.

Анализ показывает, что влияние параметров скважины в рассматриваемом интервале длин зондов ($5 < z/\alpha < 24$), с учетом "неблагоприятного" участка провисающих кривых ($7 < z/\alpha < 11$), не превышает $7 \pm 10\%$, если $\rho_n < 80$ и $\rho_c > 0,4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\rho_n/\rho_c = 200$).

Как следует из градуировочного графика для разности фаз (рис.9), при чувствительности аппаратуры, равной $2^\circ \pm 0,2^\circ$, верхний предел измерений удельных сопротивлений составит $180 \pm 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Следовательно, результаты зондирования аппаратурой ВИКИЗ не будут зависеть от параметров скважины, если длина зондов в долях радиуса скважины равна 5, 7, 10 и более ($\rho_c = 0,1 \text{ м}$), а $\rho_c \geq 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Отмеченная выше особенность поведения разности фаз как в функции длины зонда, заметная в виде "провисания", объясняет факт повышенного влияния параметров скважины (особенно низкоомной) на зонды средней длины, к которым можно отнести зонд И 0,2 И 0,8 Г (/6/, с.92).

В табл. 4.2 приведены величины δ_k/δ_n для относительных характеристик поля — $\Delta\varphi$, $\Delta A/A_1$ и $\Delta A/A_2$, а также разности амплитуд с равными прямыми полями — ΔA . Каждая характеристика поля представлена в зависимости от ряда отношений ρ_n/ρ_c , при этом некоторые равные отношения соответствуют различным удельным сопротивлениям скважины и пласта. Анализ данных таблицы показывает, что влияние скважины практически не превышает 5%, если $z/\alpha_c > 6$ и $\rho_n/\rho_c < 64$ ($\rho_c \geq 0,25 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) для всех, без исключения, характеристик. Отметим, что при $\rho_n/\rho_c = 256$ и $z/\alpha_c = 8$ ($\rho_c = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) влияние скважины проявляется занижением всех анализируемых величин примерно на 15%. В этих же условиях электрических параметров и дальнейшем увеличении длины зонда до $z/\alpha = 14$ вклад скважины уменьшается и не превышает пяти процентов.

Таблица 4.2

z/σ_c	3	4	6	8	10	14	18	24	
ρ_n/ρ_c	$\Delta \varphi$								ρ_c
2	1,243	1,087	1,011	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	0,5
2	1,170	1,059	1,005	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,9
4	1,325	1,100	1,006	0,997	0,997	0,998	0,999	0,999	1,0
8	1,542	1,160	1,006	0,997	0,997	0,997	0,998	0,999	0,9
16	1,822	1,227	1,004	0,987	0,989	0,995	0,997	0,999	1,0
64	3,240	1,577	0,991	0,955	0,967	0,985	0,993	0,997	1,0
256	8,169	2,796	0,951	0,949	0,888	0,953	0,977	0,991	1,0
ρ_n/ρ_c	$\Delta A/A_1$								
2	1,113	1,024	0,996	0,996	0,998	0,999	1,000	1,000	0,5
2	1,093	1,021	0,998	0,998	0,999	1,000	1,000	1,000	0,9
4	1,231	1,062	0,999	0,996	0,977	0,988	0,999	0,999	1,0
8	1,461	1,128	1,001	0,993	0,995	0,988	0,999	0,999	0,9
16	1,774	1,208	1,000	0,987	0,990	0,996	0,997	0,999	1,0
64	3,336	1,603	0,994	0,958	0,969	0,986	0,994	0,997	1,0
256	8,761	2,956	0,963	0,849	0,893	0,953	0,980	0,991	1,0
ρ_n/ρ_c	$\Delta A/A_2$								
2	1,125	1,046	1,000	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,5
2	1,108	1,035	1,002	0,999	0,999	0,999	1,000	1,000	0,9
4	1,239	1,068	1,003	0,997	0,997	0,998	0,999	0,999	1,0
8	1,422	1,123	1,003	0,994	0,995	0,996	0,999	0,999	0,9
16	1,708	1,197	1,002	0,987	0,991	0,996	0,998	0,999	1,0
64	3,150	1,575	0,994	0,958	0,969	0,986	0,994	0,997	1,0
256	8,197	2,893	0,962	0,855	0,893	0,953	0,978	0,991	1,0
ρ_n/ρ_c	ΔA								
2	0,7188	0,863	0,967	0,991	0,997	1,000	1,000	1,000	0,5
2	0,905	0,958	0,990	0,997	0,999	1,000	1,000	1,000	0,9
4	0,975	0,979	0,987	0,994	0,997	0,998	0,999	1,000	1,0
8	1,049	0,996	0,979	0,987	0,993	0,997	0,999	0,999	0,9
16	1,325	1,083	0,979	0,981	0,988	0,995	0,997	0,999	1,0
64	2,453	1,423	0,964	0,978	0,951	0,986	0,993	0,997	1,0
256	6,407	2,613	0,937	0,845	0,889	0,952	0,977	0,991	1,0

Примечание: $z\sqrt{f} = 2 \cdot 10^3$; $\Delta z/z = 0,3$.

Зависимость характеристик поля от смещения зондов
к стенке скважины

Исследование радиальных характеристик зондов ВИКИЗ в двух-слойной среде "скважина-пласт" было проведено в предположении, что зонды расположены на оси скважины. В реальных условиях каротажного зондирования, если не применять специальных центрирующих устройств, индукционные зонды меняют свое положение относительно стенок скважины и смещены от ее оси. В этой связи представляет интерес исследовать влияние смещения зондов на радиальные характеристики и результаты измерений удельного сопротивления пласта. Это исследование также необходимо для обоснования минимальной длины короткого зонда, размеры которого определились на основе предыдущего анализа. Для смещенного к стенке скважины индукционного зонда известно следующее выражение [3]:

$$h_2^0 = h_2^0 - \frac{22^3}{\pi a_c^3} \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\infty} m_1^2 C_n \cos(m \frac{z}{a}) I_n(m, \varepsilon) dm. \quad (4.5)^*$$

Предполагается, что двухэлементный зонд смещается параллельно оси скважины с радиусом a на расстояние r к ее стенке, при этом относительная величина смещения $\varepsilon = r/a$.

Выражение (4.5) нормировано на величину магнитного поля в воздухе: $H_2^0 = \frac{M}{2\pi z^3}$, и в нем приняты следующие обозначения:

$$h_2^0 = e^{-K_1^2} (1 + R_1 z), \quad m = \lambda a, \quad C_n = \Delta_c / \Delta,$$

$$\Delta_c = \left\{ -(1-S)^2 \frac{R_1^2 a^2}{m_2^4} n^2 m^2 - m_1^2 \left[\frac{I_n'(m_1)}{I_n(m_1)} - S \frac{m_1}{m_2} \frac{K_n'(m_2)}{K_n(m_2)} \right] \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{K_n'(m_1)}{K_n(m_1)} - \frac{m_1}{m_2} \frac{K_n'(m_2)}{K_n(m_2)} \right] \right\} \frac{K_n(m_1)}{I_n(m_1)} \cdot I_n(m, \varepsilon),$$

*) Нулевая гармоника под знаком суммы умножается на коэффициент $I/2$.

$$\Delta = (1-s)^2 \frac{k_1^2 a^2}{m_2^4} n^2 m^2 + m_1^2 \left[\frac{I_n'(m_1)}{I_n(m_1)} - s \frac{m_1}{m_2} \frac{K_n'(m_2)}{K_n(m_2)} \right] \chi$$

$$\times \left[\frac{I_n'(m_1)}{I_n(m_1)} - \frac{m_1}{m_2} \frac{K_n'(m_2)}{K_n(m_2)} \right],$$

$$s = \delta_2 / \delta_1, \quad \lambda_i = \sqrt{\lambda^2 + R_j^2}, \quad R_j^2 = -i\omega\mu\tau; \quad m_j = \lambda_j a,$$

$$j = 1; 2$$

δ_1 и δ_2 – электропроводность скважины и пласта, соответственно;

I_n – модифицированные функции Бесселя;

K_n – функции Макдональда.

Зонды ВИКИЗ формируются из двух элементарных зондов с одной общей генераторной катушкой, возбуждение тока (J) в которой производится по гармоническому закону $e^{-i\omega t}$ с магнитным моментом $M = nsj[AM^2]$. Расчет модулей и аргументов в величинах относительных характеристик $|h_{21} - h_{22}|/|h_{21}|$, $|h_{21} - h_{22}|/|h_{22}|$, $\Delta\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2|$ трехэлементных зондов производится по выражению (4.5) при $z = z_1$ и $z = z_2$ в соответствии с изопараметром $\Delta z/z_1 = \text{Const}$.

Для анализа влияния смещения зонда к стенке скважины были проведены численные расчеты при следующих параметрах модели:

$s = 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64, 1/128, 1/256, 1/512$.

$\epsilon = 0,1; 0,2, \dots, 0,7; \quad \alpha_c = 0,1 \text{ м.}$

$z_1 = 0,5; 0,7; 1,0; 1,4; 2,0 \text{ м.}$

$z_1\sqrt{f} = 2 \cdot 10^3; \quad \Delta z/z_1 = 0,3$.

На рис. 6 приведены графики зависимости разности фаз ($\Delta\varphi^0$) от величины относительного смещения зонда (ϵ) для трех зондов различной длины, соответственно. Шифр кривых – отношение удельного сопротивления скважины к удельному сопротивлению пласта (s).

Влияние величины смещения на показания короткого зонда проявляется в большей степени, чем на более длинные зонды. Вместе с тем, при смещении зонда на величину полурадуса скважины (положение корпуса прибора на стенке скважины, если радиус прибора

$$Z^2 f = 4 \cdot 10^6; \Delta Z/Z = 0,3; \text{ш.кр.} - \rho_n/\rho_c$$

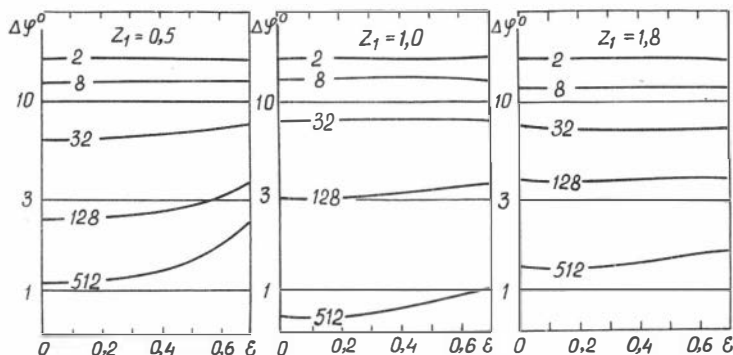


Рис. 6

равен половине радиуса скважины), результаты измерений превыша-ются не более, чем на десять процентов при $\rho_c/\rho_n \leq 1/64$.

Анализ расчета по другим относительным характеристикам электромагнитного поля вертикального магнитного диполя показал практически полное их совпадение с теми закономерностями влияния величины смещения зондов, которые установлены для разности фаз.

Таким образом, данные расчетов в оценке смещения зондов ВИКИЗ к стенке скважины не вносят существенных коррективов в выборе длины зондов и, в том числе, самого короткого.

5. ЗОНДЫ ВИКИЗ В МОДЕЛЯХ СРЕД СО СЛОЖНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ РАДИАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

Процесс вскрытия пласта-коллектора бурением скважины, заполненной буровым раствором на водной основе, может сопровождать-

ться проникновением в пласт фильтра бурового раствора. При различной минерализации бурового раствора и пластового флюида удельное электрическое сопротивление или электропроводность присквальной части пласта изменяется вследствие полного или частичного оттеснения пластовых флюидов в глубь пласта. В этом случае между оттесняемым флюидом и проникающим фильтратом образуется зона перехода от величины удельного сопротивления в промытой части пласта к его естественному значению. Этот переход от одного значения к другому может изменяться плавно /2, 6, 17, 18/ и аппроксимируется прямой или кривой второго порядка. Такая аппроксимация, по-видимому, справедлива для однородных водоносных или газонефтеносных коллекторов. В ряде случаев /1, 22, 23/ переходная зона может осложняться аномально повышенной электропроводностью за счет скопления перед фронтом проникающего фильтра сильно минерализованной пластовой воды. Очевидно, если проницаемость пласта радиально изотропна вокруг скважины, то возможно образование "кольцевой" зоны, соосной скважине. В случае радиальной анизотропии проницаемости /24/ создаются предпосылки к образованию эллипсообразной вокруг скважины зоны проникновения и "кольцевой" зоны.

К обоснованию моделирования перехода промытой зоны пласта-коллектора ступенчатыми функциями

Для задач электромагнитного высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования /25/, использующего частоты до 15 миллионов герц, целесообразно исследовать и обосновать эквивалентность моделей с плавной переходной зоной и моделей, у которых промытая часть пласта и переходная зона представлены цилиндрически-слоистым распределением удельной электропроводности.

В работе /26/ описан метод расчета электромагнитного поля магнитного и электрического диполей при произвольном распределении удельной электропроводности в зоне проникновения по направлению от скважины в глубь пласта.

Приведем выражение магнитного поля вертикального магнитного диполя на оси скважины:

$$H_z = H_z^0(\delta_c) + \frac{\alpha^3}{\pi} \int_0^\infty C(\lambda) [k_1^2 - \lambda^2] \cos \lambda z d\lambda,$$

где $H_z^0(\delta_c) = e^{-i k_1 \alpha} (1 + i k_1 \alpha)$ - поле в однородной среде с удельной электропроводностью скважины δ_c ;
 α - отношение длины зонда z к радиусу скважины a ; $k_1 = (1-i)/\delta_c$,
 δ_c - толщина скин-слоя в скважине.

H_z приведено в долях поля в воздухе $\frac{M}{2\pi L^3}$. Временная зависимость $e^{i\omega t}$.

Функция $C(\lambda)$ имеет следующий вид:

$$C(\lambda) = \frac{[y_1/z, K_1^*(z_1) + z_1 K_0^*(z_1)]}{[y_1 \frac{z_1}{2} I_1^*(z_1) - z_1 I_0^*(z_1)]} e^{-2z_1},$$

здесь

$$z_1 = \sqrt{\lambda^2 - k_1^2}, \quad K_1^*(z) = z K_1(z) e^z, \quad K_0^*(z) = K_0(z) e^z$$

$$I_1^*(z) = \frac{2 I_1(z) e^{-z}}{z}, \quad I_0^*(z) = I_0(z) e^{-z}$$

I_0 ; I_1 ; K_0 ; K_1 - модифицированные функции Бесселя. Величина y_1 находится из решения следующей задачи Коши для уравнения Риккати /26/.

$$\frac{dy}{dr} + r y^2 = \frac{\lambda^2 - k_n^2(r)}{r} \quad (5.3)$$

при граничном условии на правом конце отрезка $/a, R/$ изменения переменной r :

$$y|_{r=R} = - \frac{\sqrt{\lambda^2 - k_n^2} K_0^*(z)}{R_0 K_1^*(r)} \cdot z \quad (5.4)$$

где $z = \sqrt{\lambda^2 - k_n^2} R_0$, $k^2(r) = k_1^2 \delta(r)$, $k_n^2 = k_1^2 \delta_n^*$
 $a_0 = 1$

$\delta^*(r) = \delta(r) \delta_c$ - удельная проводимость зоны проникновения, отнесенная к удельной проводимости скважины; $\delta_n^* = \delta_n / \delta_c$ - удельная проводимость пласта в долях электропроводности скважины, $R_0 = \frac{a_0}{a}$ - радиус зоны проникновения в долях a .

Для решения задачи Коши (5.3) - (5.4) была применена схема предиктор-корректор /27/:

$$y_{i+1/2} = y_i + \frac{\Delta r}{2} \left[r_i y_i^2 - \frac{\lambda^2 - k^2(r_i)}{r_i} \right],$$

$$y_{i+1} = y_i + \Delta r \left[r_{i+1/2} y_{i+1/2}^2 - \frac{\lambda^2 - k^2 (r_{i+1/2})}{r_{i+1/2}} \right],$$

$$y_0 = y/r = R_0 \quad r_i = R_0 - i \Delta r; \quad i = 0, 1, \dots, N-1.$$

$$\Delta r = \frac{R_0 - a_0}{N} - \text{число точек сетки на отрезке } [a_0, R_0].$$

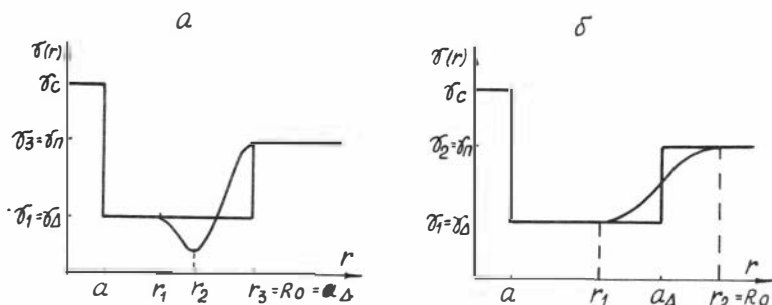


Рис. 7.

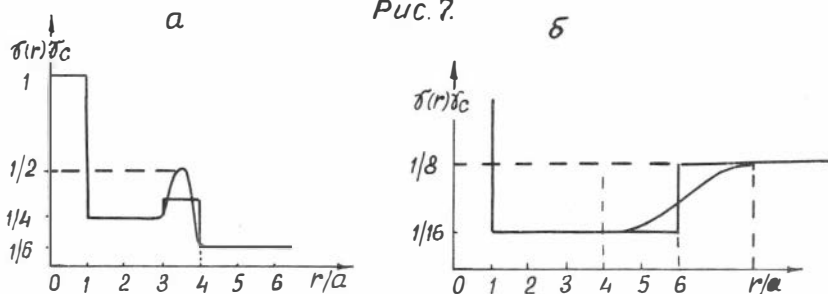


Рис. 8

Рассматривались различные модели сред. В частности проводимость $\sigma(r)$ выбиралась так, как показано на рис. 7, а или на рис. 7, б. При этом соблюдался принцип эквивалентности "продольной проводимости", т.е. "продольная проводимость" некоторой зоны проникновения с постоянной проводимостью σ_Δ равнялась проводимости при произвольном распределении $\sigma(r)$ (рис. 7, а).

$$\int_{a_0}^{R_0} \sigma(r) dr = \sigma_\Delta (R_0 - a_0) \quad (5.7)$$

или (рис. 7,б)

$$\int_{\tau}^{\tau_2} \sigma(r) dr = \sigma_A (a_A - r_1) + \sigma_n (r_2 - a_A), \quad (5.8)$$

где $r_2 = a_A + \ell$, $r_1 = a_A - \ell$, $\ell \leq a_A - a_0$.

На каждом из участков $[r_1, r_2]$, $[r_2, r_3]$ график $\sigma(r)$ представляется кубической параболой.

При $r_1 \leq r \leq r_2$:

$$\sigma(r) = \sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1) \left[3 \frac{(r - r_1)^2}{(r_2 - r_1)^2} - 2 \frac{(r - r_1)^3}{(r_2 - r_1)^3} \right], \quad (5.9)$$

при $r_2 \leq r \leq r_3$:

$$\sigma(r) = \sigma_2 + (\sigma_3 - \sigma_2) \left[3 \frac{(r - r_2)^2}{(r_3 - r_2)^2} - 2 \frac{(r - r_2)^3}{(r_3 - r_2)^3} \right]. \quad (5.10)$$

В случае распределения $\sigma(r)$, как указано на рис. 7,а, значение $\sigma_2 = \sigma(r)$ выбиралось так, чтобы выполнялось условие (5.7):

$$\begin{aligned} \sigma_2 = & \left\{ \sigma_A (R_0 - a_A) - \sigma_1 (r_1 - a_A) - \right. \\ & \left. - 0,5 [\sigma_1 (r_2 - r_1) + \sigma_3 (r_3 - r_2)] \right\} / [0,5 (r_3 - r_1)]. \end{aligned} \quad (5.11)$$

Во втором случае (рис. 7,б) график $\sigma(r)$ описывается только уравнением (5.9). Очевидно, условие (5.8) выполняется при любом $\ell = a_A - a_0$.

Для оценки влияния ступенчатого изменения σ были проведены расчеты для относительных характеристик $\Delta \varphi$, $|h_1 - h_2| / |h_1|$, $|h_1 - h_2| / |h_2|$, измеряемых изопараметрическими зондами в случае цилиндрически-слоистых моделей (трех- и четырехслойных) и соответствующих разрезов с плавным переходом σ в σ_n .

На рис. 8,а приведена зависимость $\sigma(r)$ в случае четырехслойного разреза. В табл. 5.1 даны численные результаты при $L_{1i} / R_n = 4$, $\frac{\Delta Z}{L_{1i}} = 0,3$, где $R_n = \sqrt{\frac{2}{\sigma_n \mu_0}}$, $\Delta Z = L_{1i} - L_{2i}$;

L_{1i} , L_{2i} — длины двухкатушечных зондов, входящих в состав i -го изопараметрического зонда.

Из табл. 5.1 видно, что относительные характеристики, рассчитанные при наличии четырехслойного разреза и в модели, где "окаймляющая зона" представлена в виде плавного перехода от σ_A

Таблица 5.1

α L_{ii}	4	6	8	10	12	14
$\Delta \varphi$ четырёхсл.	-98,55°	-86,37°	-93,16°	-88,81°	-81,05°	-75,51°
$\Delta \varphi$	-98,45°	-85,91°	-93,84°	-89,23°	-81,10°	-75,45°
$ h_1-h_2 / h_1 $ четырёхсл.	3,857	3,674	3,427	2,809	2,498	2,360
$ h_1-h_2 / h_1 $	3,838	3,706	3,471	2,812	2,495	2,358
$ h_1-h_2 / h_2 $ четырёхсл.	1,078	1,021	1,063	1,062	1,020	0,982
$ h_1-h_2 / h_2 $	1,078	1,018	1,066	1,064	1,020	0,982

к δ_n с сохранением условия (5.7), отличаются друг от друга меньше, чем на 1%, т.е. выполняется в этом смысле некоторый "принцип эквивалентности".

На рис. 8,6 указаны трехслойные разрезы и соответствующие им модели с размытой границей между зоной проникновения и пластом, причем переходная зона с плавным изменением электропроводности от δ_a к δ_n имеет различную протяженность ℓ : $\ell = 0,1 a_a$, $0,3 a_a$; $0,5 a_a$. В данном случае при проведении численных расчетов выполнялось условие (5.8).

В таблице 5.2 приведены численные результаты с параметрами трехслойной модели: $a_a/a = 6$, $\rho_a/\rho_c = 16$, $\rho_n/\rho_c = 8$,

$L_{ii}/\delta_n = 1,5$, а в таблице 5.3 при тех же параметрах - результаты расчетов с плавной границей перехода δ_a в δ_n .

Из таблиц 5.2 и 5.3 видно, что в данном случае также выполняется "принцип эквивалентности".

Таким образом, для аппаратуры ВИКИЗ, основанной на измерении относительных характеристик электромагнитного поля вертикального магнитного диполя, исследование радиальных характеристик зондов и расчет моделей пласта-коллектора со сложным распределением радиального градиента электропроводности можно выполнять на основе цилиндрически-слоистых сред с необходимым количеством границ.

Таблица 5.2

L_{il}/a	4	6	8	10	12	14
$\Delta \varphi$	16,88	14,02	15,26	17,04	18,56	19,68
$\frac{ h_1 - h_2 }{ h_1 }$	0,3468	0,3131	0,3557	0,3987	0,4303	0,4511
$\frac{ h_1 - h_2 }{ h_2 }$	0,3025	0,2679	0,2955	0,3251	0,3477	0,3633

Таблица 5.3

L_{il}/a	4	6	8	10	12	14
	$\ell_1 = 0,1$					
$\Delta \varphi$	16,89	14,03	15,27	17,04	18,56	19,68
$\frac{ h_1 - h_2 }{ h_1 }$	0,3469	0,3133	0,3558	0,3987	0,4303	0,4511
$\frac{ h_1 - h_2 }{ h_2 }$	0,3026	0,2680	0,2955	0,3251	0,3477	0,3633
	$\ell = 0,3$					
$\Delta \varphi$	16,91	14,07	15,31	17,06	18,56	19,67
$\frac{ h_1 - h_2 }{ h_1 }$	0,3476	0,3142	0,3563	0,3988	0,4301	0,4508
$\frac{ h_1 - h_2 }{ h_2 }$	0,3030	0,2688	0,2960	0,3252	0,3476	0,3631
	$\ell = 0,5$					
$\Delta \varphi$	16,95	14,17	15,39	17,10	18,54	19,65
$\frac{ h_1 - h_2 }{ h_1 }$	0,4389	0,3161	0,3573	0,3989	0,4299	0,4506
$\frac{ h_1 - h_2 }{ h_2 }$	0,3038	0,2703	0,2969	0,3255	0,3474	0,3630

О связи электропроводности
среды с интерпретируемым параметром

По результатам анализа магнитного поля в двухслойной среде "скважина-пласт" было установлено, что влиянием параметров скважины можно пренебречь, если минимальная длина зонда в системе ВИКИЗ будет в пять-шесть раз больше радиуса скважины. Этот вывод позволяет утверждать, что показания всех зондов ВИКИЗ в пласте*) без проникновения совпадают между собой и соответствуют однородной среде с удельной электропроводностью пласта. В соответствии с (2.4), разность фаз имеет следующую связь с электропроводностью однородной среды:

$$\Delta \varphi = \sigma^{1/2} (\alpha_1 - \alpha_2) - \operatorname{arctg} \frac{\sigma^{1/2} (\alpha_1 - \alpha_2)}{1 + \sigma^{1/2} (\alpha_1 + \alpha_2) + \sigma \alpha_1 \alpha_2}.$$

Здесь $\alpha_1 = Z_1 \sqrt{\frac{\omega \mu}{2}}$ и $\alpha_2 = Z_2 \sqrt{\frac{\omega \mu}{2}}$

Если значения изопараметров постоянны: $Z_1 \sqrt{f} = 2 \cdot 10^3$ и $\Delta Z/Z_1 = 0,3$, то коэффициенты α_1 и α_2 в (5.12) не зависят от изменения длины зонда и равны, соответственно, 4 и 2,8. В этом случае между измеряемой разностью фаз и электропроводностью однородной среды устанавливается следующая связь:

$$\Delta \varphi_0 = 1,192 \sigma^{1/2} - \operatorname{arctg} \frac{1,192 \sigma^{1/2}}{1 + 6,75 \sigma^{1/2} + 22,1 \sigma}. \quad (5.13)$$

В табл. 5.4 приведены значения первого и второго членов разности (5.13), а также разность в радианах и градусах в зависимости от проводимости однородной среды.

Из табл. 5.4 и выражения (5.13) видно, что разность фаз сложным образом зависит от электропроводности. Связь эта, пропорциональная в области высоких удельных сопротивлений ($\rho > 150 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) и малых величин разности фаз ($\Delta \varphi < 2^\circ$), постепенно переходит к зависимости $\sigma^{1/2}$, при $\rho \leq 4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ($\Delta \varphi > 30^\circ$). На рис. 9

*) Здесь имеется в виду пласт неограниченной мощности. Ниже будут исследованы параметры пласта, при которых влияние вмещающих пород на результаты радиального зондирования можно не учитывать.

Таблица 5.4

σ	4	3	2	1	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64	1/128	1/256
$1,19 \delta^{1/2}$	2,384 136,6	2,065 118,3	1,685 96,55	1,192 68,30	0,843 48,30	0,596 43,15	0,421 24,12	0,298 17,07	0,211 12,09	0,149 8,538	0,105 6,017	0,074 4,240
$\alpha z c t q$	0,023 131,7	0,026 1,489	0,031 1,775	0,040 2,290	0,050 2,862	0,060 3,434	0,068 3,890	0,073 4,175	0,073 4,169	0,068 3,890	0,059 3,376	0,049 2,809
$\Delta \varphi$	2,361 135,3	2,039 116,8	1,654 94,83	1,152 66,02	0,794 45,43	0,536 30,71	0,353 20,23	0,225 12,89	0,138 7,897	0,081 4,645	0,046 2,630	0,025 1,433

иллюстрируется связь $\Delta \varphi^0$ (ось ординат) с электропроводностью (σ - См/м), удельным сопротивлением (ρ - Ом·м) и приведенной к толщине скин-слоя длиной зонда (z/δ) - ось абсцисс.

Верхняя кривая, выполненная тонкой линией, устанавливает связь $\Delta \varphi$ с первым членом разности (5.13), а штриховая - со вторым. Разность ординат между кривыми формирует градуировочную кривую, которая отражает истинную связь разности фаз с электропроводностью однородной среды. Область значений малых величин разности фаз ($\Delta \varphi < 2^0$), по-видимому, можно представить граничной для непрецизионных измерений относительных характеристик электромагнитного поля в скважинах, т.е. когда $z/\delta_n < 0,3$. В интервале значений $0,3 < z/\delta_n < 2$ разность фаз связана трансцендентной зависимостью с электропроводностью пород, а начиная со значений $z/\delta > 2$ характеристика поля $\Delta \varphi$ описывается первым членом разности в выражении (5.13). Как следует из графиков на рис. 9 в этой области параметров среды и установки ($z/\delta > 2$) вклад второго члена выражения (5.13) в разность фаз становится пренебрежимо малым.

График зависимости $\Delta \varphi$ от σ (рис. 9) является градуировочным для всех зондов ВИКИЗ, и с помощью его устанавливается шкала для диаграмм каротажного зондирования.

Действительно, если среда однородна в радиусе исследования всех зондов, то результаты зондирования совпадают друг с другом. В этом случае их совпадение может соответствовать двух-

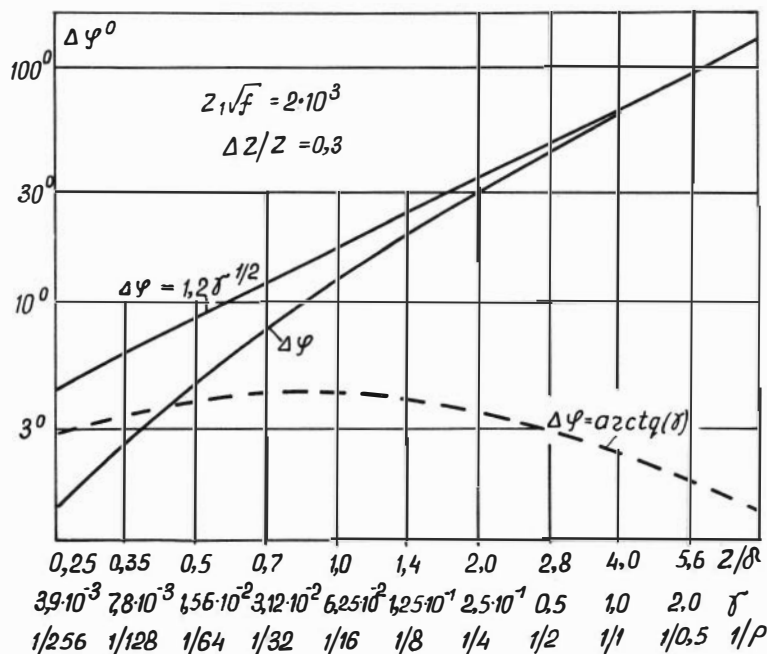


Рис. 9

слоистой среде "скважина-пласт", когда зона проникновения очень мала или отсутствует, и самый короткий зонд установки ВИКИЗ регистрирует характеристику поля, целиком обусловленную электропроводности пласта. Аналогичный результат может соответствовать трехслойной среде с глубоким проникновением фильтра высокой минерализации. В этом случае результаты зондирования определяются параметрами зоны проникновения. В качестве примера можно сослаться на рис. 10, г, где показана зависимость $\Delta \varphi$ для модели водоносного пласта ($\rho_{\eta} \approx 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) с повышающим проникновением фильтра ($\rho_{3\eta} \approx 2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\rho_c \approx 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $D_{3\eta}/d_c \approx 12$).

Радиальные характеристики зондов в трехслойной цилиндрически-слоистой модели среды

В более общих широко распространенных сочетаниях электрических свойств и размеров зон проникновения зондирование по методу ВИКИЗ позволяет получить сведения об электрических неоднородностях в радиальном распределении электропроводности. Для исследования глубинности и разрешающей способности в радиальном направлении зондов ВИКИЗ были выполнены расчеты магнитного поля для трехслойных и четырехслойных моделей пластов неограниченной мощности, которые иллюстрировали эквивалентную зону проникновения с повышающим и понижающим значениями удельного сопротивления относительно пласта и "кольцевую" окаймляющую зону. Из физических предпосылок /22/ окаймляющая зона устанавливалась более низкоомная, чем пласт и его промытая часть.

Математическое моделирование зондов ВИКИЗ в трехслойной цилиндрически-слоистой среде выполнено численным интегрированием вертикальной составляющей магнитного поля магнитного диполя /29/:

$$h_z = h_z^0 - \frac{z^3}{\pi} \int_0^\infty \lambda_1^2 C_1 I_0(\lambda_1 r) \cos \lambda_2 z d\lambda . \quad (5.14)$$

Параметры моделей представлены следующими величинами:

$$z/\delta n = 0,5$$

$$\rho_n/\rho_c = 32; \quad \rho_{zn}/\rho_c = 16; \quad 64; \quad 128$$

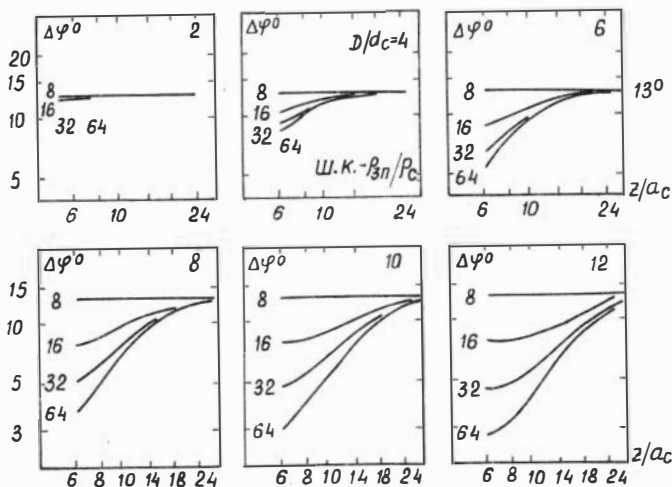
$z/\delta_n = 1,0$					
$\rho_n/\rho_c = 8;$	$\rho_{3n}/\rho_c = 4;$	I6;	32;	64	
<hr/>					
$z/\delta_n = 1,5$					
$\rho_n/\rho_c = 8;$	$\rho_{3n}/\rho_c = 4;$	I6;	32;	64	
<hr/>					
$z/\delta_n = 2$					
$\rho_n/\rho_c = 8;$	$\rho_{3n}/\rho_c = 4;$	I5;	32;	64	
<hr/>					
$z/\delta_n = 3$					
$\rho_n/\rho_c = 8;$	$\rho_{3n}/\rho_c = 4;$	I6;	32;	64	
<hr/>					
$z/\delta_n = 4$					
$\rho_n/\rho_c = 8;$	$\rho_{3n}/\rho_c = 4;$	I6;	32;	64	
<hr/>					
$D_{3n}/d_c = 2;$	4;	6;	8;	I0;	I2; I4
$\Delta z/z = 0,15$	и 0,30				

Для анализа задавались следующие компоненты поля:

$$\Delta \varphi; \quad \Delta A/A_1; \quad \Delta A/A_2; \quad \Delta A; \quad \varphi.$$

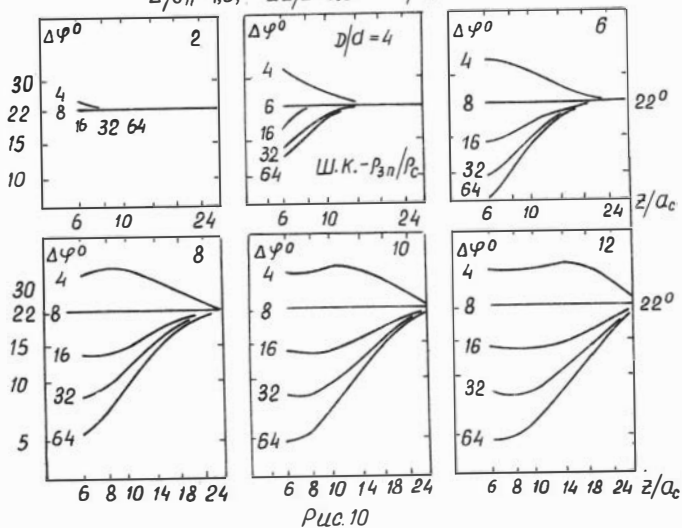
Различные значения приведенной длины зонда к толщине скин-слоя ($z/\delta_n = z/\sqrt{\frac{\rho_n}{2\rho_c} \frac{\omega}{\mu}}$) позволяют выполнить анализ в широком диапазоне изопараметров ($2\sqrt{f}$) и удельного сопротивления пласта ($\rho_n = 1/\epsilon_n$). На рис. 10, а, б, в, г представлены результаты расчета трехслойных моделей - "скважина - зона проникновения - пласт". На каждом рисунке кривые скомпонованы на шести бланках, модулем которых является отношение диаметров зоны проникновения к диаметру скважины. По оси ординат отложены значения разности фаз в градусах, по оси абсцисс - длина зонда, приведенная к радиусу скважины. Шифр кривых - отношение удельных сопротивлений зоны проникновения и скважины. На всех рисунках прямая линия, параллельная оси абсцисс, соответствует модели двухслойной среды ($\rho_{3n} = \rho_c$). Положение кривых относительно шкалы разности фаз при ясно выраженной асимптоте в области малых значений z/d_c соответствует значению удельного сопротивления зоны проникновения. Асимптотика левых ветвей проявляется тем четче, чем меньше удельное сопротивление зоны проникновения и больше ее диаметр. С увеличением длины зонда кривые стремятся к правым асимптотам, соответствующим удельному сопротивлению пласта. Даже при глубоком про-

$$z/\delta\eta = 1; \quad \Delta z/z = 0,3; \quad \rho_n/\rho_c = 8$$



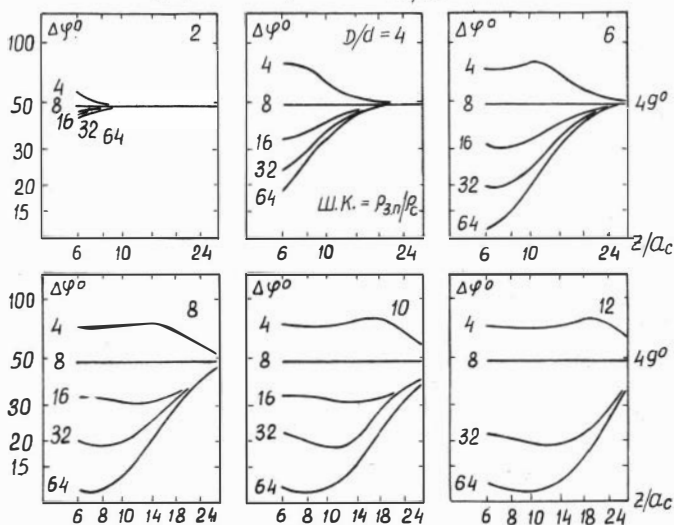
δ

$$z/\delta\eta = 1,5; \quad \Delta z/z = 0,3; \quad \rho_n/\rho_c = 8$$



$\rho_{uc} 10$

$$Z/\delta_n = 3; \quad \Delta Z/Z = 0,3; \quad \rho_n/\rho_c = 8.$$



2

$$Z/\delta_n = 4; \quad \Delta Z/Z = 0,8; \quad \rho_n/\rho_c = 8$$

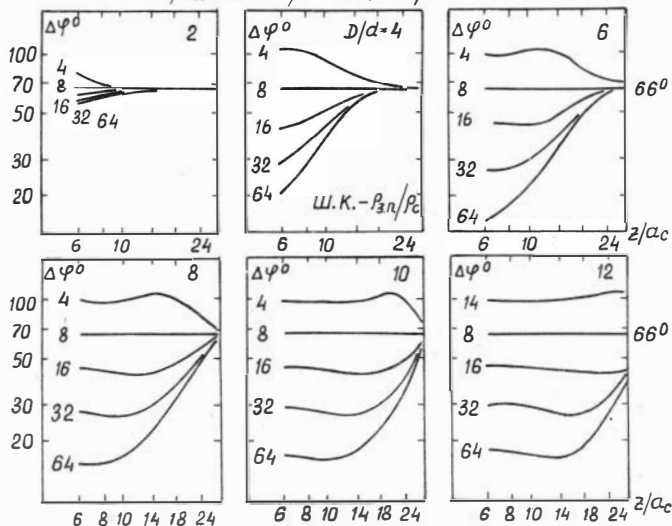


Рис. 10

никновении ($\mathcal{D}/d_c = 10$), в случае двукратного повышающего проникновения относительно удельного сопротивления пласта, показания длинных зондов ($z/d_c \approx 20$) приближаются к истинному сопротивлению пласта.

Анализ поведения разности фаз в зависимости от длины зонда (z/a), при $z^2 f = 3,5 \cdot 10^6$ для различных размеров зон проникновения ($a_{3n} = 2; 4; 6; 8; 10; 14$), удельных сопротивлений пласта ($\rho_n = 0,5; 1; 2; \dots, 256 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и зоны проникновения ($\rho_{3n} = 8; 32; 128 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) показал, что кривые в функции a_{3n}/a_c имеют различный характер относительно кривой $\rho_{3n} = \rho_n$ (рис. II, а, б).

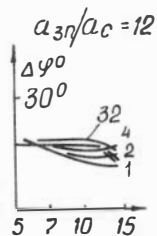
Отметим особенности кривых повышающего и понижающего характера.

Так, при повышающем проникновении (модель типа $\rho_c < \rho_{3n} > \rho_n$) на кривых отмечается минимум, левые асимптоты не проявляются, поскольку эта область кривых соответствует малым длинам зондов — z (4 + 5). Здесь расчеты характеристик поля потребовали бы учета токов смещения, что не входит в задачу ВИКИЗ.

При понижающем проникновении, в модели типа $\rho_c < \rho_{3n} < \rho_n$, на кривых отмечается переход от асимптотических значений правой ветви к асимптотическим значениям левой ветви.

При одинаковых размерах зоны проникновения малого радиуса, например, $a_{3n} = 4a_c$, показания, соответствующие ее электропроводности при понижающем проникновении ближе к действительным, чем при повышающем. При этом максимум кривых расширен, а минимум — имеет более крутую правую ветвь. При снижении электропроводности пласта и зоны проникновения (отношения ρ_n/ρ_c и ρ_{3n}/ρ_c сохраняются) отмеченные выше максимум и минимум становятся еще более выразительными. Вместе с тем, при большой контрастности в сопротивлениях зоны проникновения и скважины, например, при $\rho_{3n}/\rho_c \geq 64$, $\rho_c \approx 0,1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, кривые в области малых длин зондов, имеют "провисания", минимальные значения которых соответствуют заниженным показаниям измеряемой характеристики относительно однородной среды с электропроводностью зоны проникновения.

Таким образом, при общем уменьшении электропроводности в скважине, зоне проникновения и пласте, взаимодействие между



$$Z^2 f = 3,5 \cdot 10^6$$

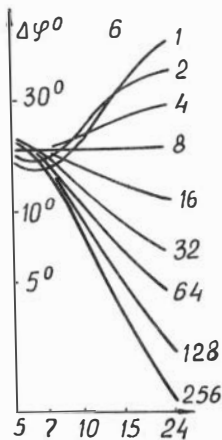
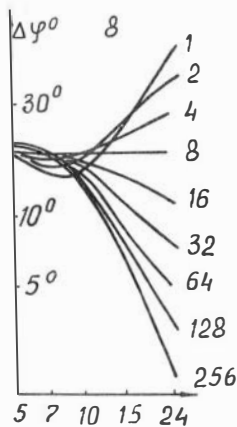
$$\Delta Z/Z_1 = 0,3$$

$$\rho_c = 10 \text{ м.м}$$

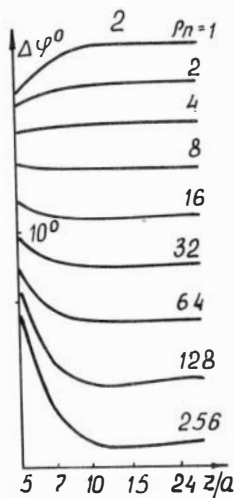
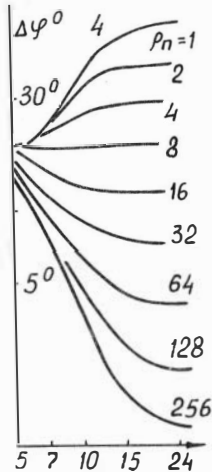
$$a_c = 0,1 \text{ м}$$

$$\rho_{3n} = 80 \text{ м.м}$$

$$\text{Ш. кр.} - \rho_n$$



α



$$2\sqrt{f} = 1,87 \cdot 10^3$$

$$\Delta Z/Z_1 = 0,3.$$

$$\rho_c = 10 \text{ мм}; a_c = 0,1 \text{ м};$$

$$\rho_{3n} = 128 \text{ мм};$$

Ш.Кр. — ρ_n

$$a_{3n}/a_c = 12$$

55

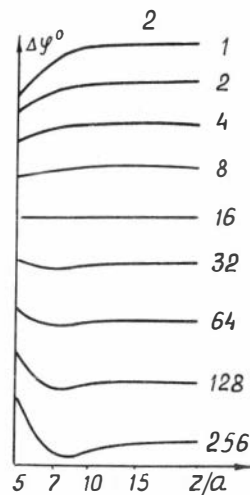
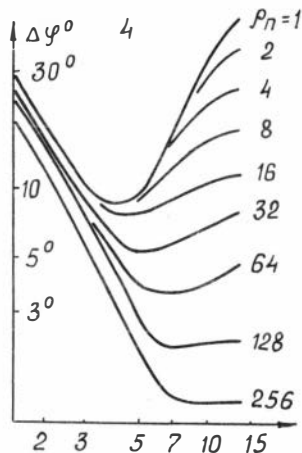
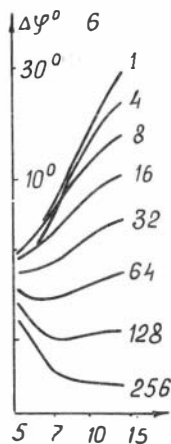
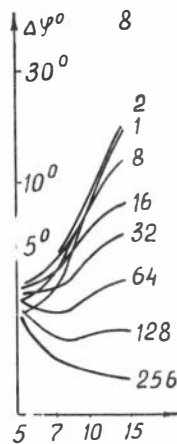
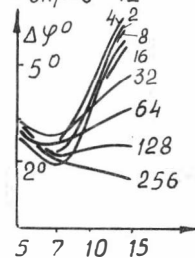


Рис. 11

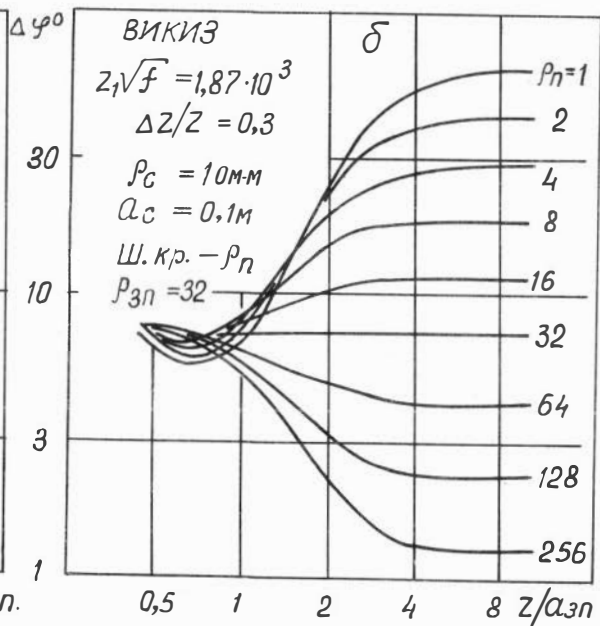
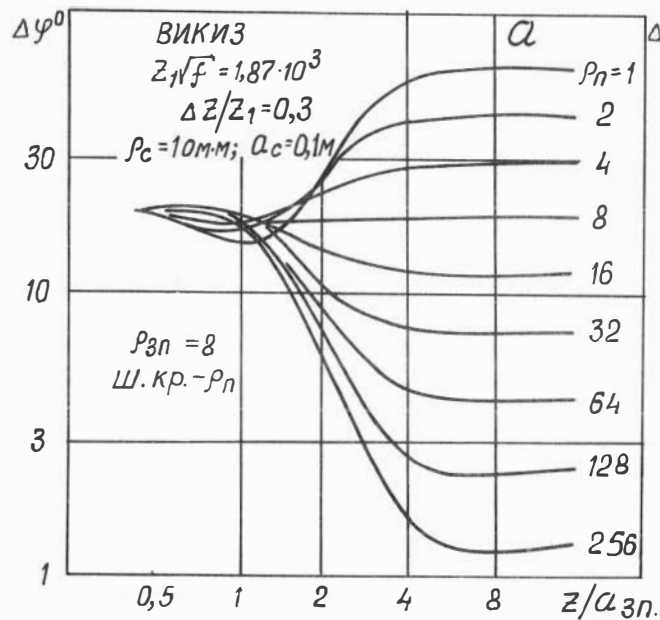
токамм таково, что физическая трактовка принципов фокусировки относительных характеристик поля (4.1) находится за пределами этой приближенной теории. Ослабление "фокусировки" приводит к аномальным проявлениям измеряемых характеристик в моделях сред с относительно высокими абсолютными значениями электропроводностей (ρ'_c и ρ'_{3n}) и повышенными отношениями УЭС зоны проникновения относительно скважины.

О палетках ВИКИЗ для определения параметров зоны проникновения и пласта

Из анализа расчетов для двухслойных цилиндрически-слоистых сред установлено пренебрежимо малое влияние скважины в широких пределах изменения ее параметров. Этот вывод предопределил упрощенную методику интерпретации более сложных моделей. Так, например, трехслойная модель может быть представлена палеткой аналогичной двухслойной. При этом на оси абсцисс длина зондов выражается в долях размера зоны проникновения, ось ординат - измеряемая характеристика поля (ΔU и т.д.). Шифром кривых является удельное сопротивление. При необходимости модулем палетки могут быть параметры скважины, если последняя оказывает заметное влияние на результаты измерений. Весь комплект палеток, в диапазоне измерений разности фаз от I до I00° ($300 > \rho > 0,5$ Ом·м) может быть представлен на четырех бланках. В этом случае кривые с различными шифрами ρ_n и ρ_{3n} не пересекают друг друга на поле палеток. В табл. 5.5 приведены данные о размещении соответствующих кривых на бланках палеток.

Таблица 5.5

		Бланк I			Бланк 2		Бланк 3		Бланк 4	
ρ_n		I	I6	I28	I	32	4	64	8	I28
		0,5	8	64	I	I6	2	32	4	64
ρ_{3n}	I	I6	I28	2	32	4	64	8	I28	
	2	32	256	4	64	8	I28	I6	256	
	4	64	-	8	I28	I6	256	32	-	
	8	I28	-	I6	256	32	-	64	-	
	I6	-	-	32	-	64	-	I28	-	



Образец таких палеток представлен на рис. 12 а,б. Правая асимптота кривых соответствует значению удельного сопротивления пласта, левая – зоне проникновения (промытой части пласта) или эквивалентной зоне проникновения.

Интерпретацию результатов измерений ВИКИЗ можно выполнить следующим путем. По результатам измерений строится экспериментальная кривая на бланке с координатными шкалами палетки. Численные значения ординаты бланка соответствуют интерпретируемой характеристике поля, например, разности фаз, а ось абсцисс – длинам зондов установки ВИКИЗ. Если экспериментальная кривая имеет асимптотические значения $\Delta\varphi$ в области коротких или длинных зондов, то в зависимости от этого признака определяют выбор соответствующей палетки. Так, для асимптотики слева (короткие зонды или большие размеры зоны проникновения) выбирают палетку со значениями разности фаз в асимптотиках теоретических кривых, близких или совпадающих с экспериментальными. Затем экспериментальный график накладывают на палетку, совмещая шкалу разности фаз палетки с соответствующими значениями интерпретируемого графика. Далее, смещением графика вдоль оси абсцисс палетки, совмещают экспериментальный график с одной из палеточных кривых. Полное совпадение кривых определяет значение удельных сопротивлений зоны проникновения и пласта по левой и правой асимптотам теоретической кривой, соответственно. При этом одновременно определяется диаметр зоны проникновения. Его величина соответствует численному значению длины зонда на оси экспериментального графика в точке пересечения с вертикальной линией палетки $Z/D_{эл} = 1$.

Сопоставление характеристик БКЗ, ИБКЗ и ВИКИЗ

Оценку радиальной глубины зондирования методом ВИКИЗ выполним путем сопоставления данных с зондированиями ИБКЗ, которое в свою очередь сопоставлялось с БКЗ. На основании сравнения было установлено /30/, что ИБКЗ превосходит БКЗ. Тем не менее, индукционное боковое каротажное зондирование /30/, основанное на регистрации активной компоненты электромагнитного поля вертикального диполя, обладая значительно лучшими характеристиками по сравнению с БКЗ, имеет существенные недостатки.

Действительно, в области малого параметра, где активная компонента прямо пропорциональна электропроводности среды ($h_z^a = \tau z^2 \omega \mu / 2$) относительная доля полезных сигналов на уровне прямого поля становится чрезвычайно малой величиной и тем заметнее, чем меньше длина зонда ($h_z^a = \frac{H_z^a \omega \mu}{H_z^2 \omega \mu}$).

Многокатушечные же зонды, основанные на принципах геометрической фокусировки, еще больше усугубляют фактор относительного уменьшения полезного сигнала. Эта особенность фокусирующих зондов иллюстрируется на рис. 13. Здесь относительная активная компонента магнитного поля представлена в зависимости от обобщенного параметра $z_1/\beta = z \sqrt{\frac{\gamma \mu \omega}{2}}$ для двухкатушечного и двух различных трехкатушечных зондов с равными прямыми полями в воздухе.

Анализ показывает, что увеличение параметра фокусировки ($t = z_2/z_1$) приводит к уменьшению полезного сигнала. Здесь отметим, что параметр фокусировки слабо влияет на компенсацию токов индуцированных в скважине, если $z/a > 10$. Однако при уменьшении длины зонда до значений $z_1/a \approx 5$, с целью более детального изучения прискважинной области, параметр фокусировки приходится увеличивать ($t \geq 0,9$). Эта вынужденная необходимость еще более снижает относительный уровень полезного сигнала и, тем самым, затрудняет эффективное измерение электропроводности относительно высокоомной зоны проникновения. В отличие от ИБКЗ зонды ВИКЗ решают задачу изучения ближней зоны (малыми по длине зондами) без потерь чувствительности к аномальным сигналам в силу изопараметричности конструктивных параметров.

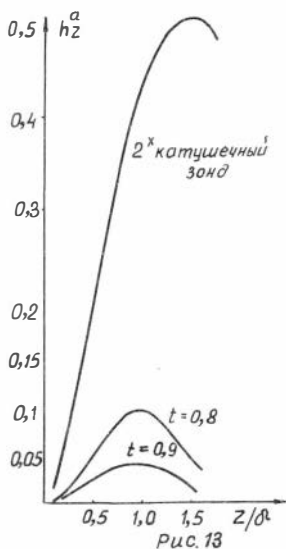


Табл. 5.6

$\frac{P_n/\rho_c}{a_{3n}/a_c}$	1	2	4	8	16	32	64	128	Примечан.
2	$\frac{4,0}{1,0}$	$\frac{5,6}{1,2}$	$\frac{6,4}{1,1}$	$\frac{8,0}{0,7}$	$\frac{9,6}{0,8}$	$\frac{10,6}{0,9}$	$\frac{11,2}{1,0}$	$\frac{12,0}{1,0}$	$\frac{u_k}{\rho_{3n}/\rho_c} = 10$
4	$\frac{8,0}{2,0}$	$\frac{11,2}{1,8}$	$\frac{12,8}{1,6}$	$\frac{16}{0,4}$	$\frac{19,2}{1,6}$	$\frac{21,2}{2,0}$	$\frac{22,4}{2,2}$	$\frac{24,0}{2,4}$	$\frac{u_k u_3}{\rho_{3n}/\rho_c} = 8$
6	$\frac{-}{3,0}$	$\frac{-}{3,0}$	$\frac{-}{2,4}$	$\frac{-}{0,6}$	$\frac{-}{2,4}$	$\frac{-}{3,0}$	$\frac{-}{3,4}$	$\frac{-}{3,6}$	$\rho_c = 10 \text{ м.м}$
8	$\frac{16}{3,6}$	$\frac{22}{3,4}$	$\frac{25}{2,6}$	$\frac{32}{0,6}$	$\frac{38}{3,0}$	$\frac{42}{4,0}$	$\frac{45}{4,2}$	$\frac{48}{4,4}$	$a_c = 0,1 \text{ м}$
$\frac{16}{12}$	$\frac{32,0}{6,0}$	$\frac{44,0}{5,0}$	$\frac{50,0}{4,8}$	$\frac{64,0}{0,8}$	$\frac{76,0}{4,5}$	$\frac{84,0}{5,0}$	$\frac{90,0}{5,5}$	$\frac{96,0}{6,0}$	

2	$\frac{6,4}{1,4}$	$\frac{6,4}{1,4}$	$\frac{6,4}{1,0}$	$\frac{6,4}{1,0}$	$\frac{6,4}{0,4}$	$\frac{6,4}{0,4}$	$\frac{12,8}{1,0}$	$\frac{12,8}{1,2}$	$\frac{u_k}{\rho_{3n}/\rho_c} = 160$
4	$\frac{12,8}{2,4}$	$\frac{12,8}{2,4}$	$\frac{12,8}{2,0}$	$\frac{12,8}{2,0}$	$\frac{12,8}{0,8}$	$\frac{12,8}{2,4}$	$\frac{6,4}{2,4}$	$\frac{6,4}{1,0}$	$\frac{u_k u_3}{\rho_{3n}/\rho_c} = 128$
6	$\frac{-}{3,6}$	$\frac{-}{3,6}$	$\frac{-}{3,0}$	$\frac{-}{3,0}$	$\frac{-}{2,0}$	$\frac{-}{2,0}$	$\frac{-}{1,4}$	$\frac{-}{1,0}$	$\rho_c = 10 \text{ м.м}$
$\frac{16}{12}$	$\frac{51,5}{6,0}$	$\frac{51,5}{6,0}$	$\frac{51,5}{6,0}$	$\frac{51,5}{6,0}$	$\frac{51,5}{3,6}$	$\frac{51,5}{3,6}$	$\frac{51,5}{3,0}$	$\frac{51,5}{1,0}$	$a_c = 0,1 \text{ м}$

В табл. 5.6 сопоставлены длины зондов (в метрах) ИБКЗ и ВИКИЗ в моделях сред с различными размерами зон проникновения a_{3n}/a_c . В числителе — длина трехэлементного зонда ИК ($t = 0,9$), в знаменателе — аналогичный зонд ВИКИЗ ($t = 0,7$). Длины зондов соответствуют условию выхода измеряемой характеристики поля на показания, соответствующие удельному сопротивлению пласта. Рассмотрены два близкие друг другу удельные сопротивления зоны проникновения в одинаковых условиях различных УЭС пласта. При этом представлено понижающее проникновение — ($\rho_c < \rho_{3n} > \rho_n$) и повышающее ($\rho_c < \rho_{3n} < \rho_n$). Отметим, что повышенное значение $\rho_{3n}^{ИК} = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, относительно

$\rho_{3n}^{ВИКИЗ} = 8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, создает неравные и лучшие условия, при которых длины зондов ИК занижены, а зонды ВИКИЗ завышены. Вместе с тем, разница эта не должна быть решающей, поскольку в условиях двухслойной среды, когда $\rho_{3n}/\rho_c \approx \rho_n/\rho_c$ и оценивается исключение влияния параметров скважины, порядок в расхождении длин зондов различных методов зондирования остается тем же.

В целом, анализ показывает, что в методе ВИКИЗ задача об определении истинного УЭС пласта решается значительно меньшими длинами зондов, чем в методе ИБКЗ. Так, в случае модели типа $\rho_c < \rho_{3n} > \rho_n$, длины зондов ИБКЗ в десять и больше раз превышают зонды ВИКИЗ.

Здесь следует отметить, что выделение и оценка электропроводности зоны проникновения методом ИК в сильной мере затруднено из-за влияния параметров скважины. В этой связи левые ветви кривых на рисунках I4, а, б не достигают асимптотики, соответствующей ρ_{3n} , даже в случае глубокого проникновения

$a_{3n} = 16 a_c$. Для получения полной кривой зондирования, например, при $a_{3n}/a_c = 8$, независимо от УЭС скважины, зоны проникновения и пласта, длины зондов ИБКЗ следовало бы брать от 0,5 м до 32 м, т.е. с превышением длинного зонда над коротким в 64 раза.

Зонды ВИКИЗ аналогичную задачу решают более полно. Левые асимптоты кривых, при глубоком проникновении ($a_{3n}/a_c \gg 10$), выходят на значения, равные УЭС зоны проникновения. При этом практически полные кривые зондирования получают в случае, если применить длины зондов в интервале от 0,5 до 4 м, т.е. с пре-

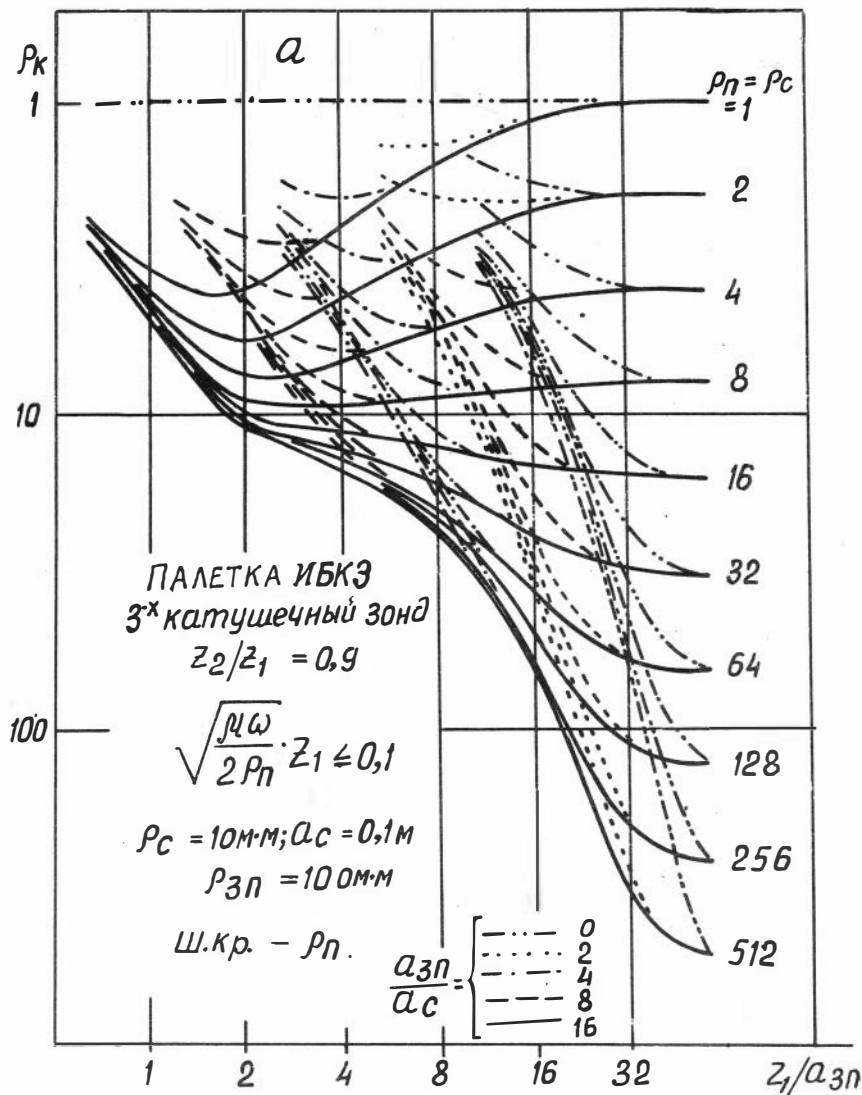


Рис. 14

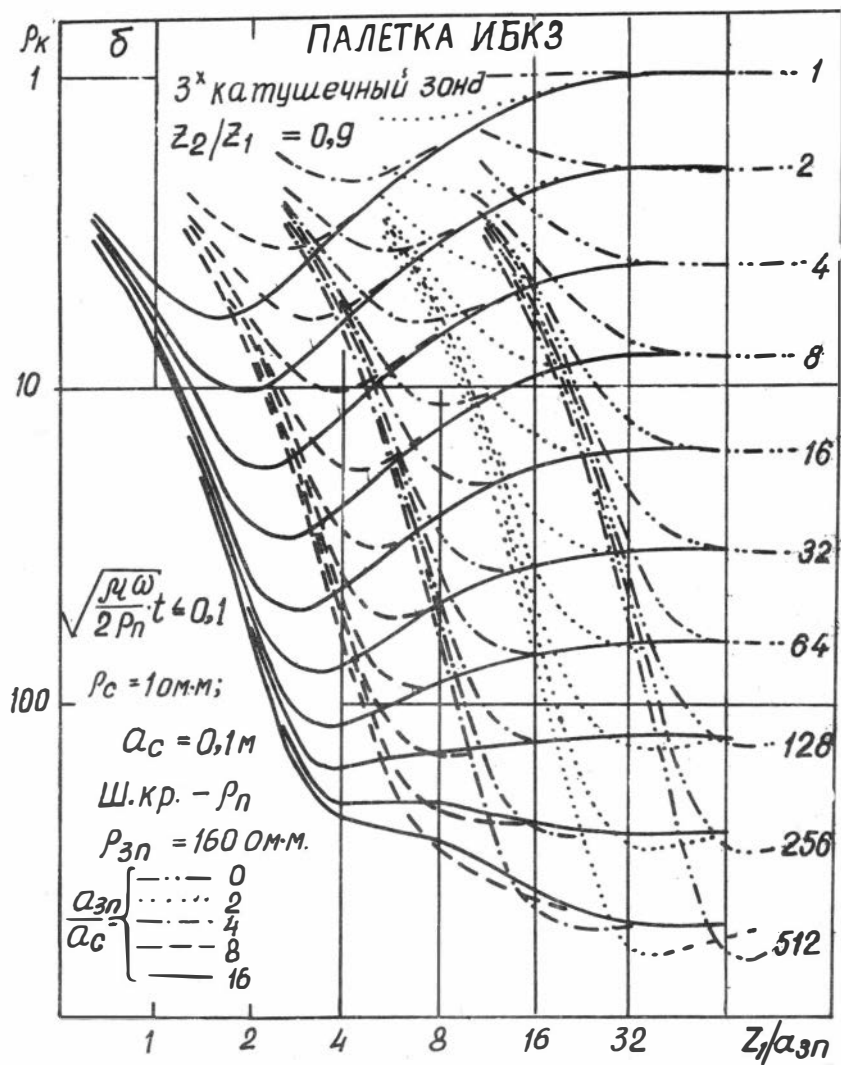


Рис. 14

вышением в 8 раз. В большинстве вариантов с повышающим проникновением, когда $\rho_{3n} \leq 10 \rho_n$, достаточно четырехкратного превышения длинного зонда установки относительно короткого ($0,5 < z_1 < 2,0$). Дискретность промежуточных длин зондов должна, очевидно, составлять геометрический ряд с показателем ряда, близким $\sqrt{2}$. По-видимому, при изучении более сложных моделей, чем трехслойная, показатель геометрического ряда зондов может быть еще меньше, например, близким к величине $\sim 2^{1/4}$. В этом случае два комплексных прибора ВИКИЗ, в каждом из которых длины зондов соответствуют промежуточным значениям каждого из рядов, могут решать более сложные задачи зондирования.

Таким образом, при сопоставимых длинах зондов в комплексе зондирующих установок, радиальная глубинность исследования зондов ВИКИЗ выше, чем у зондов ИБКЗ.

Моделирование "кольцевой" зоны повышенной электропроводности

Исследование влияния кольцевой зоны на относительные характеристики поля осуществлялось на основе численных расчетов четырехслойной модели с цилиндрическими границами (§ 5, п. 1). Положение цилиндрического слоя, соответствующего кольцевой зоне, задавалось двумя существенно различными положениями ее относительно скважины: 1) неглубоким, при котором радиус первой цилиндрической границы кольцевой зоны равнялся $4a_c$; 2) глубоким — с радиусом, равным $8a_c$. Толщина "кольцевого" слоя составляла 20% от размера радиуса, т.е. $0,8a_c$ и $1,6a_c$, соответственно, для неглубокого и глубокого образования кольцевой зоны. Удельное сопротивление зоны изменялось с уменьшением относительно УЭС пласта в 4, 2, $4/3$ раза. Расчеты выполнены для параметра $z_1/\rho_n = 1,5$ и $\Delta z = (0,15 \text{ и } 0,30)$. При изопараметре $2\sqrt{f} = 2 \cdot 10^3$, УЭС пласта равно 8 Ом м.

Изучались две существенно различные модели с "кольцевой" зоной.

Первой моделью иллюстрировался нефтеносный неуплотненный пласт-коллектор с межзерновой пористостью (водонасыщенностью 20%) без примеси глинистых частиц. В пластах такого типа возможно образование зоны проникновения с УЭС, равным пласту ($\rho_{3n} = \rho_n$), т.е. н е й т р а л ь н о е проникновение

фильтра. На рис. 15, а,б представлены схемы распределения электропроводностей в таком пласте, при "неглубоком" и "глубоком" расположении относительно скважины, для двух значений размера базы: $\Delta Z = 0,15 Z_1$ и $\Delta Z = 0,30 Z_1$, соответственно. Ниже схем приведены графики различных относительных характеристик поля в зависимости от приведенной к радиусу скважины длины зонда - Z_1/a_c . Относительные характеристики поля выражены в виде δ_k/δ_n , где δ_k - измеряемая характеристика поля в сложной среде, δ_n - та же характеристика поля в однородной среде с УЭС пласта.

Вторая модель соответствует повышающему проникновению фильтра, относительно УЭС пласта, характерному для нефтеносного уплотненного пласта со средним значением УЭС зоны проникновения $\beta_{pn} = 4 \beta_n = 32 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. На рис. 16, а,б представлены графики и модели сред, отличающиеся от первой модели пониженным значением электропроводности зоны проникновения.

Общими для всех моделей являлись условия на параметры скважины - $a_c = 0,1 \text{ м}$ и $\rho_c = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Шифром всех кривых являются УЭС "кольцевого" слоя - 8, 6, 4 и 2 Ом·м, которым приданы цифровые обозначения 1; 2; 3; 4 соответственно. Кривая "1" при нейтральном проникновении соответствует двухслойной модели "скважина-пласт", а при повышающем - трехслойной "скважина - зона проникновения - пласт", т.е. моделям без "кольцевой" зоны. Присутствие кривой "1" на поле графиков придает наглядность в изменении измеряемых характеристик поля, если увеличивается электропроводность "кольцевого" слоя.

1. Рассмотрим модель с нейтральным проникновением и кольцевой зоной: $\Delta Z = (0,15 \text{ и } 0,3) Z_1$ (рис. 15, а,б).

Малое различие между электропроводностью "кольцевого" слоя и пласта (модель среды - "2", кривая "2") приводит к незначительному увеличению δ_k/δ_n и несущественной приподнятости кривой "2" над двухслойной кривой "1". Можно предположить, что кривая "2" может оказаться, в этом случае, эквивалентной двухслойному разрезу с меньшим УЭС пласта.

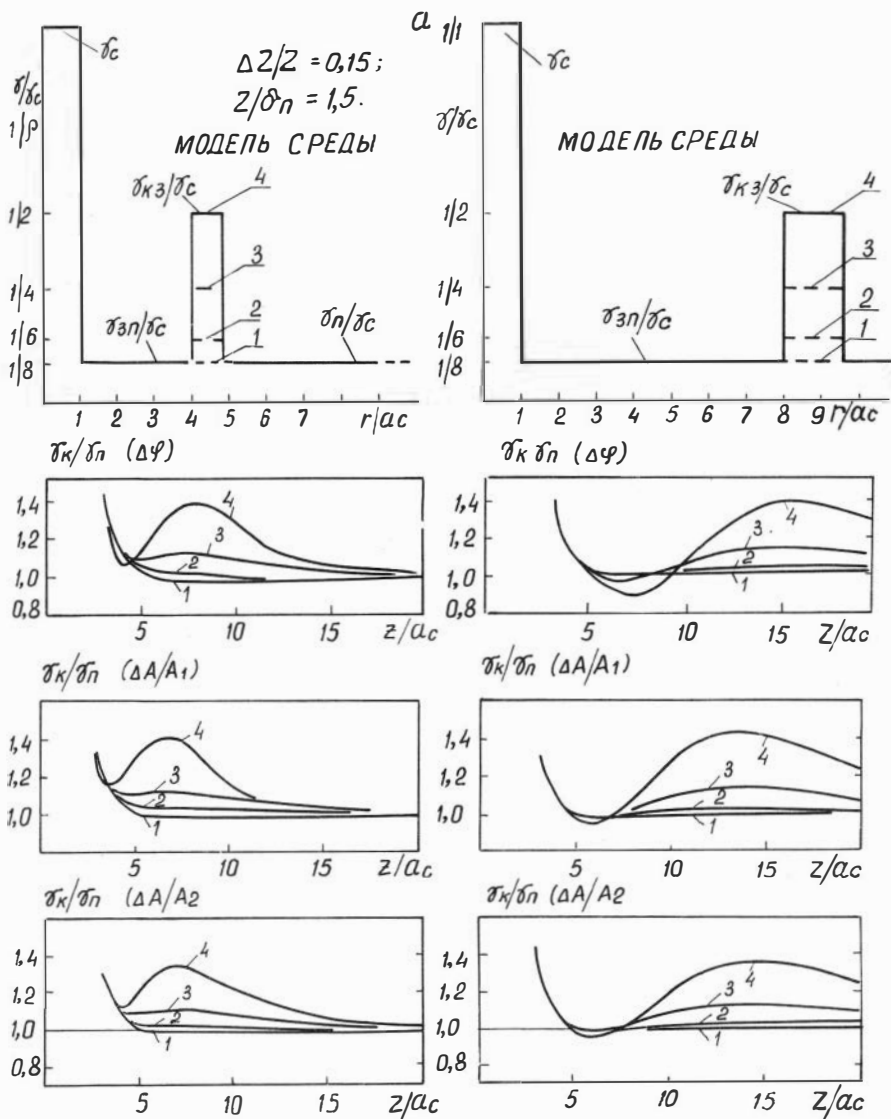


Рис.15

δ

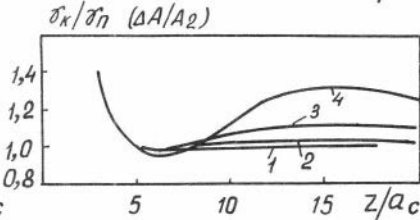
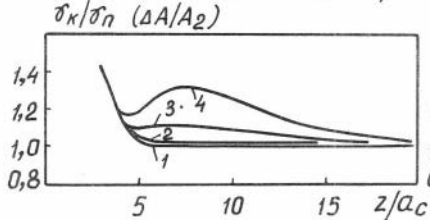
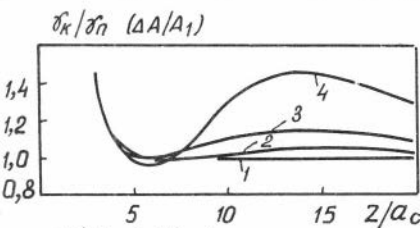
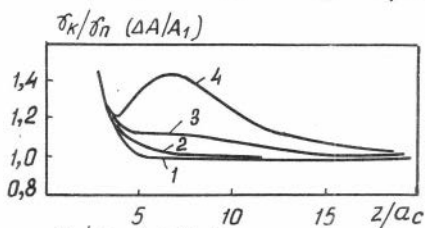
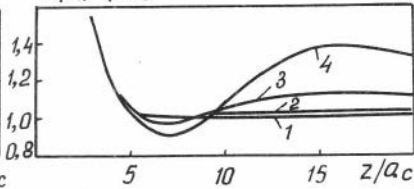
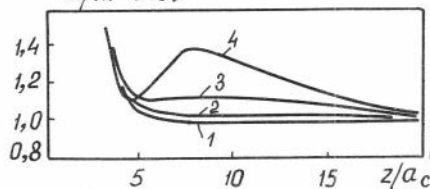
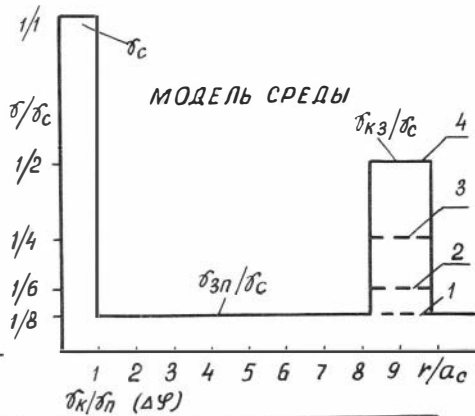
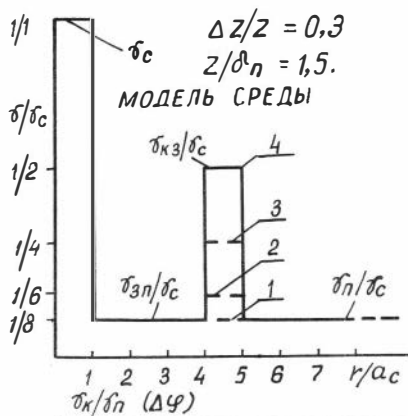


Рис.15

При увеличении электропроводности кольцевой зоны (модель среды "3", кривая - "3") график поведения характеристик поля адекватен модели трехслойной среды с понижающим проникновением в правой, от максимума σ_k/σ_n части кривой зондирования, а в левой от максимума области - повышающему проникновению. Эти особенности кривой "3" с большей выразительностью проявляются в случае "глубокого" положения кольцевой зоны от скважины ($r/d_c = 8 + 9,6$).

Дальнейшее снижение УЭС кольцевого слоя (модель среды - "4" и кривая "4") сопровождается ярко выраженным максимумом σ_k/σ_n . Положение максимума на теоретической кривой зондирования для $\Delta\varphi$ согласуется со схемой - моделью следующим соотношением: $Z_1 \approx 2r_1$ (r_1 - радиус до первой границы зоны), т.е. радиальная глубина до слоя равна половине длины зонда против максимума кривой зондирования. Характеристики поля $\Delta A/A_1$ и $\Delta A/A_2$ имеют несколько иное расположение максимума кривой зондирования - расстояние " r " на схеме - модели среды приходится на правую спадающую ветвь кривой зондирования. Этот факт подтверждает большую глубинность относительных характеристик по сравнению с разностью фаз. В целом, можно отметить исключительную выразительность кривых зондирования "окаймляющей" зоны повышенной электропроводности в случае "нейтрального" или близкого к нему характера проникновения фильтра-та бурового раствора.

2. Исследуем случай "повышающего" проникновения с кольцевой зоной: $\Delta Z = (0,15 \text{ и } 0,3) Z_1$ (рис. 16, а,б).

"Малая" и "средняя" контрастность между электропроводностями кольцевой зоны и пласта (модель сред "2" и "3" и кривые с этими же цифрами) создают незначительную приподня-тость кривых зондирования по отношению к кривой трехслойной модели - "1", т.е. относительно модели среды без кольцевой зоны. Таким образом, наличие кольцевого слоя за зоной не-глубокого проникновения и слабо контрастного перепада σ_k/σ_n над σ_n увеличивает характеристики поля, регистрируемые "малыми" и "средними" длинами зондов. При этом становится менее выразительным минимум на кривых зондирования, соответствующий зоне проникновения пониженной электропроводности

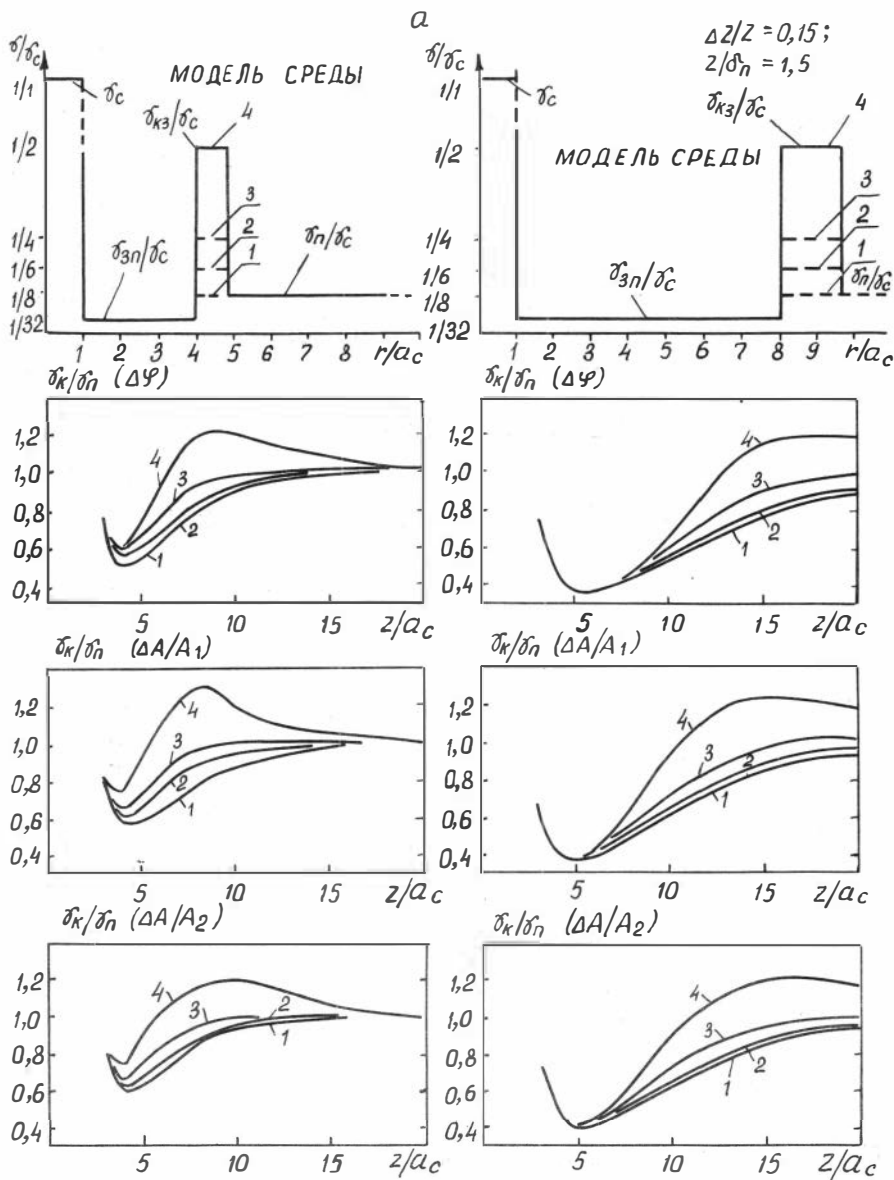


Рис. 16

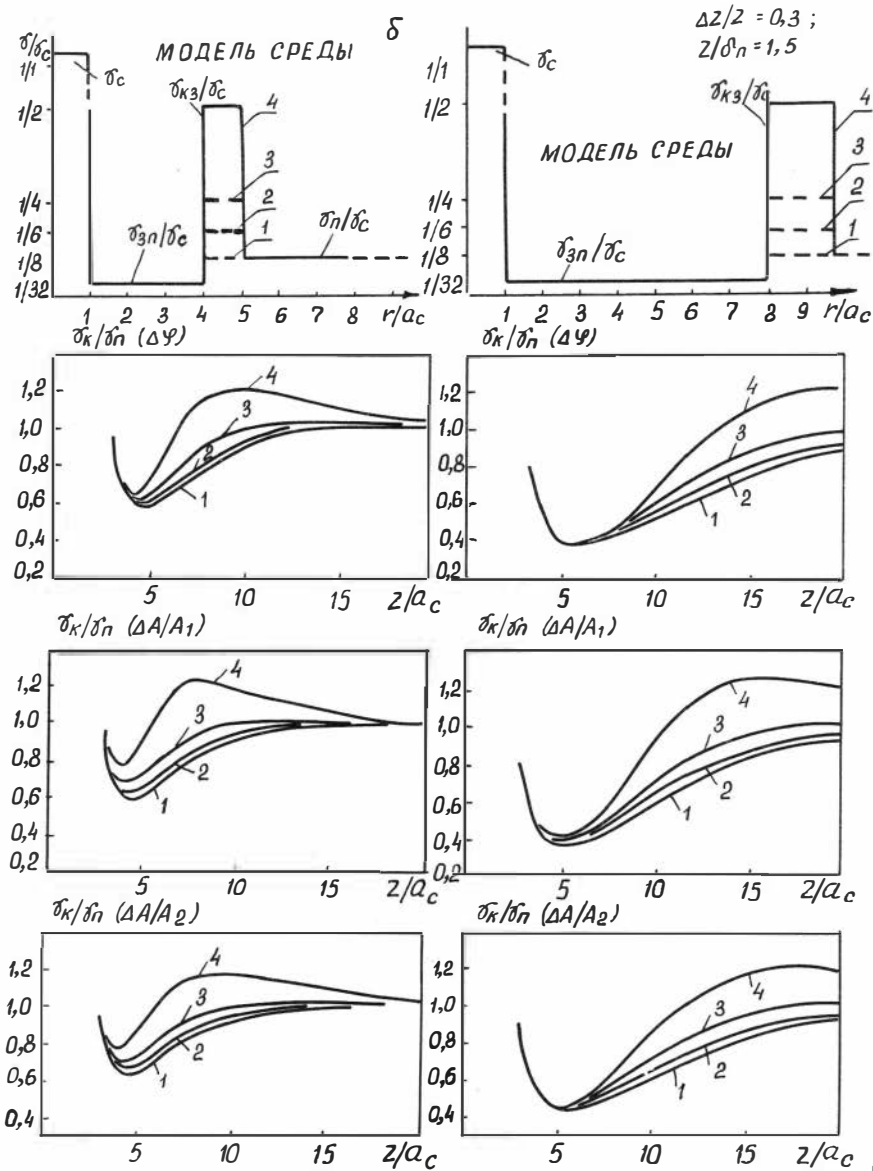


Рис.16

относительно кольцевого слоя и пласта.

Более "глубокое" расположение кольцевой зоны от скважины в глубь пласта не оказывает влияния на измерения короткими зондами ($Z/\alpha c$ 5 + 6) и, в этом случае, разность фаз менее чувствительна к удаленной кольцевой зоне, чем относительные характеристики $\Delta A/A_1$ и $\Delta A/A_2$.

На этом основании можно утверждать, что разность фаз как регистрируемая характеристика поля при зондировании имеет лучшую радиальную разрешающую способность.

В целом, мало контрастный перепад электропроводностей между σ_{k3} и σ_n создает предпосылки к эквивалентности кривых зондирования четырехслойного разреза с трехслойным, но менее глубоким повышающим проникновением фильтра.

При значительной контрастности электропроводностей кольцевого слоя перед незатронутой частью пласта ($\sigma_{k3} = 4 \sigma_n$), на кривых зондирования наблюдается характерный максимум отношения σ_k/σ_n , который имеет правую ниспадающую ветвь с асимптотой, равной электропроводности пласта - $\sigma_k/\sigma_n = 1$.

Сравнительный анализ по моделям "нейтрального" и "повышающего" проникновения позволяет отметить некоторые особенности.

В первой модели кривым зондирования, соответствующим областям "коротких" и "длинных" зондов присущи показания $\sigma_k/\sigma_n > 1$. Небольшое "провисание" кривой ($\sigma_k/\sigma_n < 1$) можно наблюдать при "средних" длинах зондов и значительной контрастности электропроводностей между кольцевой зоной и пластом ($\sigma_{k3}/\sigma_n = 4$). Это особенно характерно для "глубокого" проникновения кольцевой зоны ($r = 8 \alpha c$).

Во второй модели показания коротких зондов всегда меньше единицы ($\sigma_k/\sigma_n < 1$). С увеличением длины зонда отношение

$\sigma_k/\sigma_n \rightarrow 1$ с тем большей крутизной кривых, чем больше отношение электропроводностей σ_{k3}/σ_n . При контрастности $\sigma_{k3}/\sigma_n > 2$ кривые зондирования образуют максимум показаний σ_{k3}/σ_n , располагающийся выше асимптоты $\sigma_k/\sigma_n = 1$.

Сопоставление графиков для различных размеров измерительной базы ($\Delta Z/2_1$) при прочих равных условиях позволяет отметить лучшую радиальную разрешающую способность зондов с меньшим размером базы. Этот эффект, вместе с тем, наиболее

четко проявляется в случае "неглубокого" проникновения кольцевой зоны (4ac) и имеет физически объяснимую трактовку. При неглубоком расположении неоднородностей радиального градиента электропроводности по исследуемым схемам-моделям короткие зонды, питаемые более высокими частотами, обладают меньшей глубиной проникновения индуцируемых в среде токов. Поэтому кривые "4" имеют ярко выраженный максимум и крутой спад после максимума. В моделях с более "глубоким" расположением кольцевого слоя относительно скважины (8ac) максимум для кривой "4" менее выразителен. В этом случае обнаружение этого слоя связано с удлинением зондов. Однако в силу требований постоянства величин $Z_i \sqrt{f_i}$ для всех зондов, более длинные зонды имеют относительно низкие частоты возбуждаемого поля, и, следовательно, более широкую область концентрации индуцируемых токов в среде. Это приводит к тому, что в формировании регистрируемых характеристик поля участвуют большие объемы среды и разрешающая радиальная способность снижается. Вместе с тем, анализ данных расчета и графиков на рис. 15, а,б и 16, а,б показывает, что лучшими радиальными разрешающими свойствами обладают разность фаз, затем - отношение $\Delta A/A_1$.

6. ЗОНДЫ ВИКИЗ В МОДЕЛЯХ СРЕД С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ ГРАНИЦАМИ РАЗДЕЛА

Достоверность результатов измерений радиального градиента удельного сопротивления в пластах-коллекторах, по-видимому, будет зависеть от того, насколько удовлетворительно зонды ВИКИЗ будут локальны к исследованию электропроводности пласта и нечувствительны к электрическим параметрам пород, между которыми находится изучаемый пласт-коллектор. Поэтому представляется необходимым исследование характеристик электромагнитного поля на оси трехэлементных зондов в присутствии горизонтальных границ между пластами различной толщины. Зонды различной длины, образующие комплекс ВИКИЗ возбуждаются токами различных частот в соответствии с принципом изопараметричности ($Z_i \sqrt{f_i} = \text{const}$). Представляет интерес исследовать влияние этих конструктивных параметров на вертикальные характеристики. Определить, что является основным в формировании кривой профилирования при переходе

через границы раздела между средами с различными электропроводностями — длина зонда или частота? Априори можно утверждать, что короткие зонды, питаемые более высокими частотами, чем длинные зонды, обладают лучшей локальностью в пластах одной и той же толщины. Это очевидно, т.к. с уменьшением частоты диффузия токов охватывает больший объем исследуемой среды и, следовательно, возможен вклад в измеряемые характеристики поля от токов индуцированных в удаленных участках среды, в том числе, и от вмещающих пласт пород. Эти эффекты рассмотрим на примерах профилирования различными зондами через границу раздела двух различных по электропроводности сред (рис. 17, а,б).

Очевидно, конфигурация кривых профилирования через границы раздела пластов различна для зондов ВИКИЗ. В этой связи представляется необходимым выявить особенности положения экстремальных значений кривых профилирования относительно границ пластов.

Это позволит уточнить точки записи зондов и минимальные размеры пластов, при которых кривые диаграммы своими экстремумами располагаются в интервале исследуемых пластов в соответствии с установленной точкой записи того или иного зонда ВИКИЗ.

В работах по высокочастотным методам электромагнитного каротажа /5, 6, 32/ достаточно подробно изучались характеристики элементарных и многокатушечных зондов. Вместе с тем, в этих исследованиях диапазон частот ограничивался задачами: либо измерениями электропроводности, либо диэлектрической проницаемости. Отсюда полярность рассматриваемых диапазонов частот. Задачи ВИКИЗ определяются необходимостью изучать как близкие к зонду и скважине участки среды (зону проникновения), так и дальние (собственно пласт). В этой связи диапазон частот, используемых в зондах ВИКИЗ, перекрывает "межполярную" область, в которой нет достаточно полных исследований вертикальных характеристик для многоэлементных зондов.

Основой для математического моделирования вертикальных характеристик зондов послужили исследования, выполненные в разное время сотрудниками лаборатории электромагнитных полей ИГТ СО АН СССР /19, 20, 32, 33, 5/.

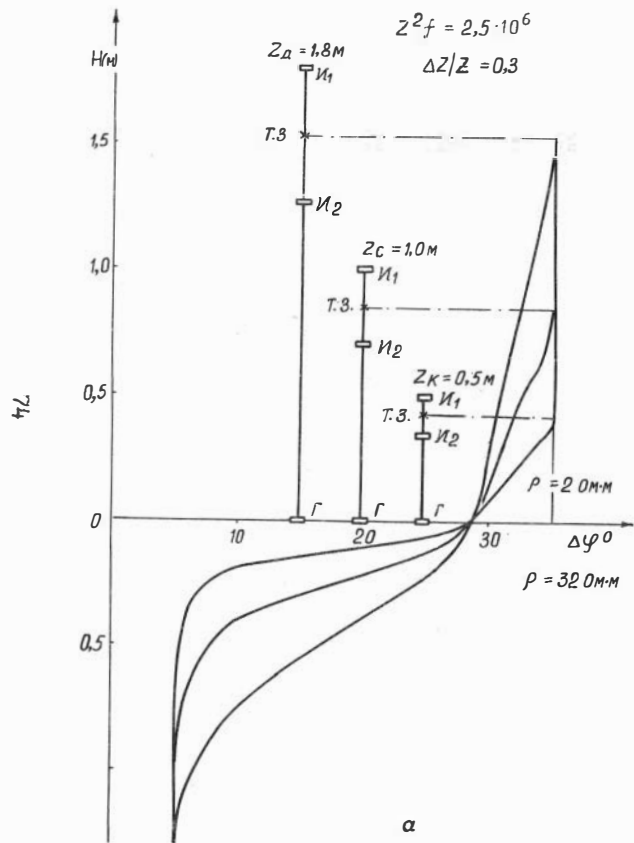
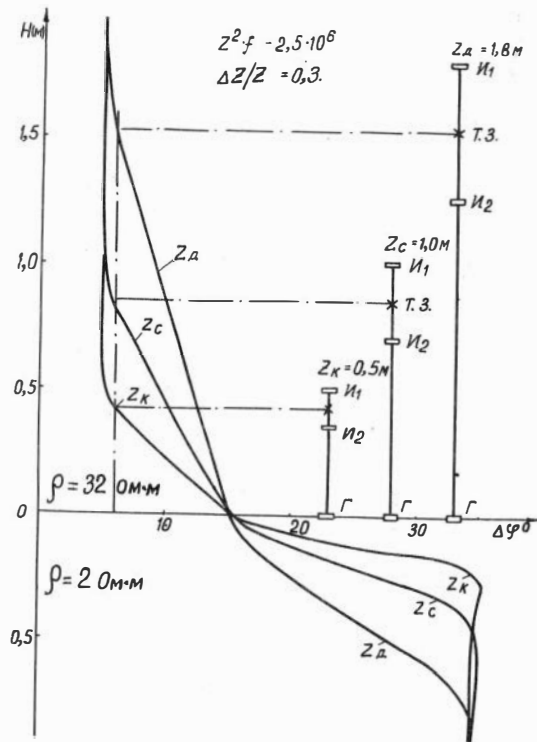


Рис.17



Профилирование границы между пластами неограниченной мощности

В данной модели исследовались три зонда различной длины из ряда зондов ВКИЗ: "короткий", "средний" и "длинный". Величина изопараметра принята относительно небольшой:

$$z^2 f = 2,5 \cdot 10^6 \text{ и } \Delta z / z = 0,3.$$

В табл. 6.1 приведены основные параметры зондов.

Таблица 6.1

№	z_1 (м)	z_2 (м)	Δz (м)	f (МГц)
1	0,50	0,35	0,15	10,0
2	1,00	0,70	0,30	2,5
3	1,80	1,16	0,64	0,77

Расчет кривых профилирования выполнен для различных относительных характеристик, а также разностной амплитуды с равными прямыми полями. Ниже приведенный анализ проведен на одной из относительных характеристик — разности фаз. Расположение элементов зонда при профилировании таково, что генераторная и две измерительные катушки каждого из зондов расположены "снизу-вверх", соответственно.

I. Анализ кривых профилирования "короткого" зонда (№ 1, табл. 6.1).

а) Модель среды со следующими УЭС:

нижнее полупространство имеет $\rho = 32 \text{ Ом} \cdot \text{м}$,
верхнее — $2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (рис. 17, а).

При перемещении зонда снизу-вверх десятипроцентное увеличение показаний измеряемого параметра ($\Delta \varphi$) наступает с момента пересечения верхней крайней измерительной катушкой границы раздела между пластами. С этого момента показания резко увеличиваются при незначительном перемещении зонда в направлении поверхности раздела.

Замедление роста ΔU наблюдается при пересечении границы раздела второй измерительной катушкой. С этой точки резкого перегиба кривой последняя стремится к асимптотическому значению разности фаз, соответствующему УЭС верхнего пласта. В момент пересечения границы раздела генераторной катушкой значения соответствуют УЭС пласта.

б) Модель среды: нижнее полупространство имеет $\rho = 2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, верхнее — $32 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (рис. 17, б).

При приближении зонда к высокоомному пласту показания незначительно возрастают (не более чем на 3% от показаний в низкоомной среде нижнего полупространства), образуя "всплеск", размытый по направлению профилирования на длину немногим более размера измерительной базы.

С момента входа крайней измерительной катушки в высокоомную среду верхнего полупространства показания ΔU начинают резко уменьшаться. При этом угол между границей раздела и кривой профилирования составляет 170° .

При переходе границы раздела второй измерительной катушкой направление кривой профилирования меняется. С этой характерной точки угол уменьшается до 130° .

Асимптотические показания, соответствующие однородной среде с удельным сопротивлением верхнего полупространства, достигаются с момента пересечения границы раздела генераторной катушкой. При этом ошибка в показаниях менее 10%.

Таким образом, все искривления диаграммы профилирования, полученной коротким зондом при переходе границы раздела между средами с различными УЭС, заканчиваются на небольшом расстоянии от границы, практически равном расстоянию от генераторной катушки до центра между измерительными.

2. Анализ кривых профилирования "среднего" зонда (№ 2, табл. 6.1).

а) Модель среды: нижнее полупространство с УЭС, равным $32 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, верхнее — $2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (рис. 17, а).

Влияние верхней, более проводящей, среды проявляется на кривой профилирования на большем удалении от границы раздела,

чем для короткого зонда. Переход через границу раздела первой измерительной катушкой сопровождается интенсивным увеличением показаний. Однако углы наклона кривой, до и после характерного перегиба, обусловленного моментом перехода границы второй измерительной катушкой, значительно больше, чем у короткого зонда.

Это обстоятельство приводит к тому, что асимптотические значения для этого зонда в верхнем низкоомном полупространстве достигаются при большем удалении от границы раздела измерительной базы зонда, чем для короткого зонда.

б) Модель среды с параметрами $2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $32 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ — низ и верх, соответственно, от границы раздела (рис. 17,б).

При движении зонда по направлению к границе раздела (снизу-вверх) ее влияние начинает проявляться, когда крайняя верхняя измерительная катушка находится на расстоянии немногим менее половины длины зонда. Влияние это отмечается очень незначительным увеличением показаний измеряемого параметра ($\sim 2\%$).

Интенсивный спад показаний ΔU для этой кривой начинается с момента пересечения верхней крайней измерительной катушкой границы раздела. Таким образом, влияние более высокоомного верхнего полупространства на показания зонда, находящегося в нижней низкоомной среде, начинается на расстоянии меньшем, чем основная длина зонда, и практически слабо заметно на расстоянии, равном половине длины зонда между границей раздела и крайней измерительной катушкой. Для кривой профилирования этим зондом также характерен переход внутренней измерительной катушкой через границы раздела сред. Большой угол между кривой профилирования и границей раздела в нижней среде и, наоборот, меньший угол — в верхней среде, отличают "средний" зонд от "короткого". Соответственно, увеличивается интервал длины, на котором достигаются асимптотики "средним" зондом. Выход на асимптоту показаний в верхней среде происходит на расстоянии, когда зонд полностью выходит из нижней среды и удален своей генераторной катушкой от границы раздела на интервал, равный, примерно, 10% от длины зонда. В этот момент показания против центра базы зонда совпадают с показаниями в однородной среде с электропроводностью верхнего слоя.

3. Анализ кривых профилирования "длинного" зонда (№ 3, табл. 6.1, рис. 17, а,б).

Не останавливаясь на деталях кривой профилирования длинного зонда, в общих чертах схожей с предыдущими кривыми, отметим меньшие значения углов (отрицательного ниже границы раздела и положительного - выше), под которыми формируется кривая профилирования этого зонда в процессе пересечения его элементами границы раздела.

В этой связи подчеркнем только, что выход кривой профилирования на асимптотику показаний в среде с более высокими значениями УЭС, чем нижняя среда, происходит также на расстоянии, равном длине между генераторной катушкой и центром из измерительной базы. В более низкоомной верхней среде относительно нижней, асимптотика для "длинного" зонда наступает при немногим меньших расстояниях центра базы зонда от границы раздела и составляет, примерно, 90% от длины зонда.

В заключение анализа кривых профилирования зондами различной длины в изопараметрическом сочетании основных конструктивных параметров ($z, f, \Delta z$) можно допустить следующее физическое толкование.

При наличии одной генераторной катушки в составе зонда можно представить следующее распределение магнитосиловых линий и токов, индуцируемых в электропроводящей среде.

Пусть генераторный диполь находится на достаточно удаленном расстоянии от границы раздела и можно полагать, что он размещен в однородной среде с заданной электропроводностью. В этом случае магнитосиловые линии размещаются сплошным кольцевым потоком, замкнутым по периметру магнитного диполя. Электрические силовые линии нормальны магнитным. При этом в любой горизонтальной плоскости можно выделить соответствующую составляющую кольцевого тока проводимости, соосную диполю. Электрическое поле целиком определяет распределение плотности токов в среде, выражение для которого имеет следующий вид /6/:

$$j = \frac{i \sigma_m \omega M}{4 \pi R^2} \cdot e^{i \frac{R}{z_0}} \cdot e^{-\frac{R}{z_0}} \cdot \left(1 + \frac{R}{z_0} - i \frac{R}{z_0}\right) \sin \theta, \quad (6.1)$$

где R – расстояние от точки наблюдения до диполя с моментом M , ориентированным по оси $\theta = 0$. Согласно (6.1), плотность токов зависит от частоты поля, электропроводности среды и расстояния до диполя. При увеличении любого из этих параметров усиливается проявление скин-эффекта, то есть затухание поля, и, следовательно, происходит значительное ослабление плотности токов. Вместе с тем, заметно возрастает временной сдвиг между характерными величинами электромагнитного поля на различных удалениях от генераторного диполя вдоль его оси. Таким образом, фазовый сдвиг между амплитудами эдс, регистрируемыми на оси диполя, формируется всей совокупностью индуцируемых в среде токов и определяется главным образом параметрами зондов и электрическими свойствами (σ) среды. При изопараметрическом исполнении зондов, амплитуды и фазовые сдвиги между ними выравниваются только в том случае, если объемы среды (расстояния до границ раздела сред) пропорционально возрастают с увеличением длины зондов.

Действительно, с ростом длины зонда и уменьшением частоты возбуждаемого поля влияние "нижней" среды при выходе зонда в "верхнее" полупространство проявляется на большем расстоянии. Однако в относительных значениях коэффициента затухания, это расстояние одинаково для всех зондов ИИИЗ. Этот факт объясняет одинаковость условий выхода на асимптотику кривых профилирования в верхнем полупространстве для всех зондов. Это условие соответствует расстоянию между центром базы и границей раздела, которое равно длине соответствующего зонда.

Следовательно, интервал между асимптотическими показаниями, соответствующими нижнему и верхнему значениям УЭС, зависит от длины зонда и соотношения в УЭС слоев. При этом интервал можно разделить на две неравные части.

В высокоомном верхнем слое он длиннее (рис. 17,б) и отличается от характерного перегиба на границе раздела до асимптотики. Если в эту точку пересечения кривой с границей поместить генераторные катушки зондов, то асимптотические показания или любые другие равного значения для всех зондов приходятся на одни и те же точки записи зондов. Так, для центра базы это будут почти асимптотические значения, соответствующие УЭС верхней среды (ошибка менее 10%); для центров зонда иные, но для всех зондов

равные по измеряемому параметру.

В низкоомном нижнем слое интервал кривой короче от асимптотики до точки перегиба, размещенной на границе раздела, и равен половине длины зонда (рис. 17, б).

В случае, когда верхний слой по УЭС меньше, чем нижний, интервал между асимптотикой и характерным перегибом кривой профилирования в точке пересечения с границей раздела превышает половину длины зонда и зависит от соотношения электропроводностей верхнего и нижнего слоев (рис. 17, а).

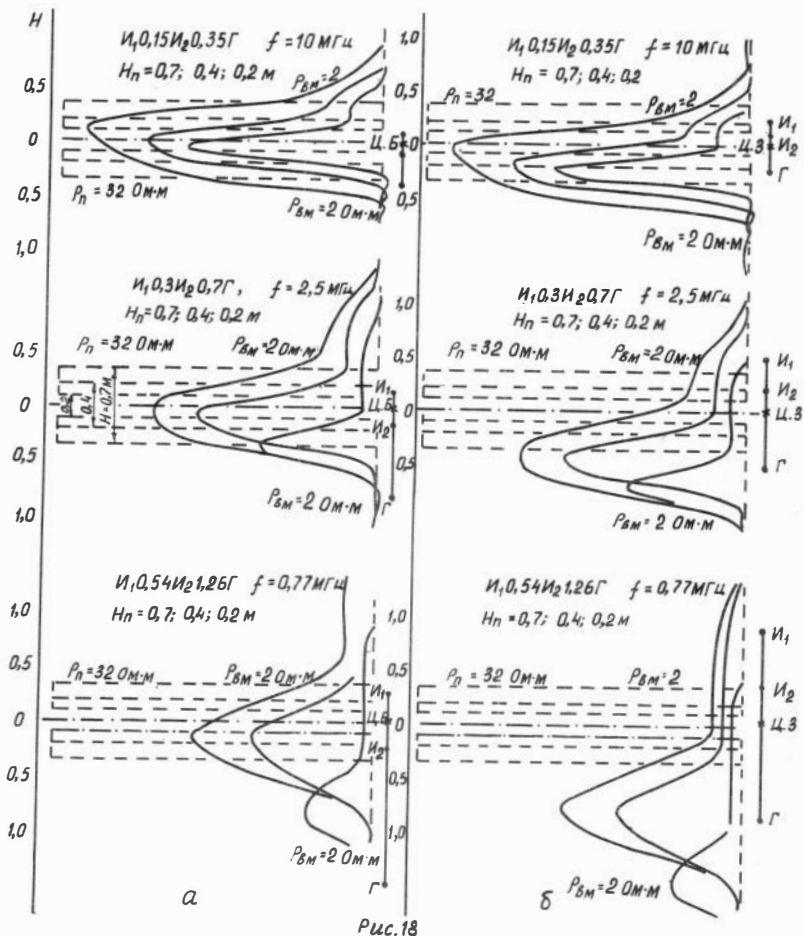
Вероятно, верхний слой (в случае пласта ограниченной мощности) не будет оказывать влияния на результаты измерений в пласте, если его "подошва" будет удалена от центра базы на интервал близкий к половине длины зонда.

Ниже, при анализе соответствующих моделей, будет показана справедливость этого предположения.

Профилирование тонких пластов ($H < Z$)

Исследование влияния параметров тонких пластов, мощность которых не превышает размеры зонда, представляется целесообразным для уточнения оптимальной точки записи зондов, а также их локальности. Под локальностью исследования будем понимать такие показания зонда в пласте ограниченной мощности, которые близки или совпадают с истинным сопротивлением пласта бесконечной мощности и целиком обязаны его параметрам. Кроме того, изучение кривых профилирования в тонких пластах позволит уточнить положение экстремальных точек кривой относительно центра пласта и точки записи зонда. Это необходимо уточнить для расчета палеток магнитного поля вертикального магнитного диполя в пластах ограниченной мощности, в которых естественно предусмотреть экстремальные значения регистрируемых характеристик.

На рис. 18, а, б, в приведены кривые профилирования высокоомного пласта ($32 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), заключенного между низкоомными ($2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) неограниченной мощности. При математическом моделировании возбуждение генераторного диполя предусматривалось гармоническими токами различных высоких частот в соответствии с изопараметром $Z_i^0 f = 2,5 \cdot 10^6$ и одновременное изучение относительных характеристик поля геометрически подобными зондами. Результаты модели-



рования представлены по трем зондам различной длины: короткому, среднему и длинному, которыми выполнено профилирование трех "тонких" пластов мощностью 0,2; 0,4; 0,7 м. На рисунках границы пластов выделены штриховыми линиями, которые слева ограничены значением измеряемого параметра, соответствующим УЭС пласта неограниченной мощности.

Правые асимптоты кривых находятся в соответствии с УЭС вмещающих пород. В качестве анализируемой характеристики взята разность фаз.

Кривые профилирования, расположенные на левой стороне рис.18, соответствуют диаграмме, при которой за точку записи зонда принят центр между его измерительными элементами. Диаграммы кривых на правой стороне рис.18 "привязаны" к центру зонда. Сопоставление кривых профилирования между собой, левых с соответствующими правыми, показывают, что "привязка" диаграмм к центру измерительной базы зонда обеспечивает лучшее совпадение их экстремальных показаний с серединой пласта. При этом минимум показаний разности фаз в данном высокоомном пласте тем ближе расположен к центру пласта, чем больше его мощность. Показания измеряемого параметра тем точнее соответствуют истинной величине УЭС пласта, чем выше частота, меньше длина зонда и больше мощность пласта.

Таким образом, можно заключить, что наилучшей локальностью исследований обладает короткий зонд. При этом можно отметить, что определение истинного значения УЭС высокоомного пласта, в соответствии с рассматриваемой моделью ($\rho_{\text{вм}}^H < \rho_n < \rho_{\text{вм}}^S$), зависит, главным образом, от соотношения между мощностью пласта и длиной зонда. Очевидно, измеряемый параметр соответствует истинному УЭС пласта только в случае, когда мощность пласта превышает длину зонда. В противном случае, как явствует из результатов моделирования, кривые несут качественную информацию об УЭС.

Следует отметить, что с увеличением длины зонда (снижением частоты, одновременно) форма кривых против одного и того же пласта деформируется в направлении перемещения зонда. При этом экстремальные показания достигаются менее крутыми участками кривых, а выход к асимптотике разности фаз в среде, расположенной выше пласта, сопровождается большей длиной характерной "по-

полочки" заниженных показаний $\Delta\varphi$.

На рис. 19, а,б,в приведены кривые профилирования низкоомного пласта (2 Ом·м), заключенного между высокоомными (32 Ом·м) неограниченной мощности. Значения изопараметров, соотношение длин зондов и мощностей пластов те же, что и для рис. 18. Кривые профилирования с точкой записи в центре между измерительными катушками зонда и собственно в центре зонда расположены на поле рис. 19 слева и справа, соответственно.

Сопоставление кривых в зависимости от точки записи зонда показывает, что "привязка" диаграмм к центру измерительной базы зонда обеспечивает лучшее соответствие кривых с идеальной формой диаграмм распределения УЭС.

При этом максимальные показания разности фаз зависят только от соотношения длины зонда и мощности пласта. Вертикальные характеристики изопараметрических зондов не зависят от частоты.

Анализ данных расчета и приведенные на рис. 19 кривые показывают, что значения разности фаз против низкоомного пласта ближе к истинным, чем в высокоомном, при прочих равных условиях. Однако выход на асимптоту показаний измеряемого параметра, соответствующую пласту, обеспечивается только в том случае, если мощность пласта превышает длину зонда.

Изучение зависимости $\delta\kappa/\delta n = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\varphi} \frac{\text{неодн.}}{\text{одн.п.}}$

от отношения мощности пласта к длине зонда позволяет сделать вывод о том, что максимальные или минимальные показания разности фаз (соответственно, против низкоомного и высокоомного (пластов) зависят только от соотношения между мощностью пласта и длиной зонда. Если мощность пласта примерно в два раза больше чем длина зонда, то показания измеряемой относительной характеристики не зависят от вмещающей среды. Отсюда следует, что изучение радиальной неоднородности (радиального градиента) УЭС можно проводить в том случае, когда мощность пласта превышает размеры длинного зонда из комплекта ВИКИЗ. Например, если $H = 2$ м, то для оценки УЭС внутри пласта, свободного от влияния вмещающих пород, могут быть использованы данные измерений, полученные зондами следующих размеров: 0,5; 0,7; 1,0 м.

Характерные "полочки" на кривых профилирования выше кровли низкоомного пласта по своей протяженности и конфигурации схо-

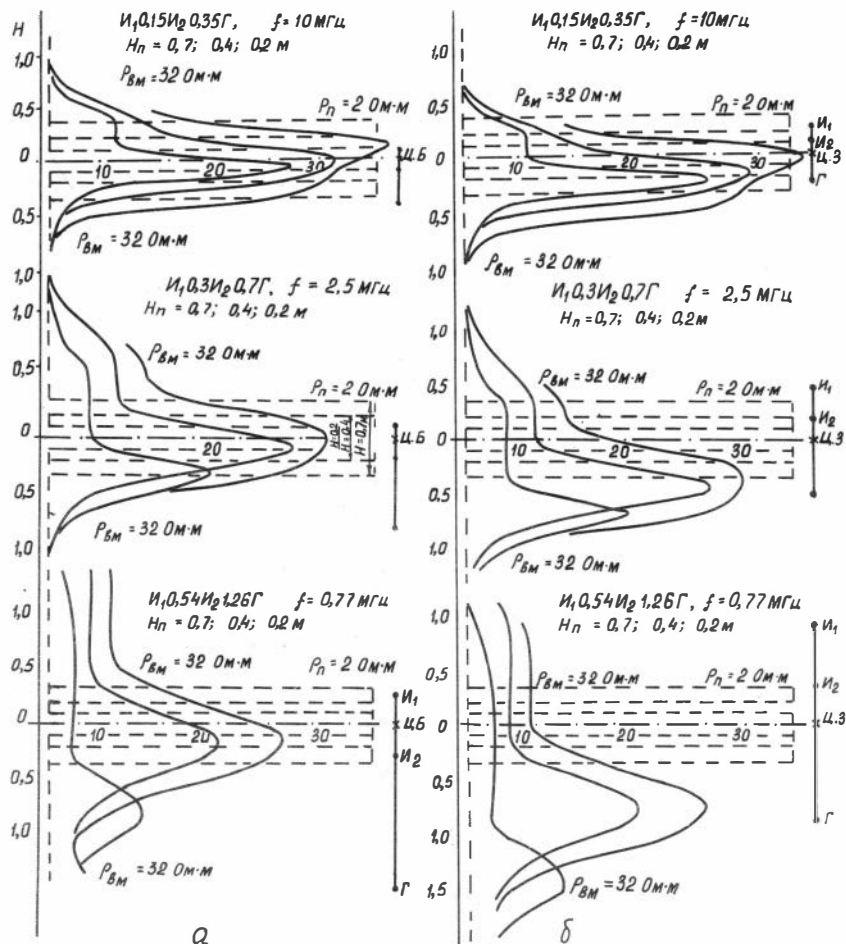


Рис. 19

жи с соответствующими участками кривых против высокоомного пласта. При этом кривые профилирования низкоомного и высокоомного пласта одной и той же толщины зеркально совпадают друг с другом.

На основании выполненного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Экстремальные значения относительных характеристик поля, получаемые зондом, длина которого больше толщины пласта, занижены относительно показаний этого же зонда в однородной среде с электропроводностью пласта. Различие этих величин тем больше, чем длиннее зонд относительно толщины пласта.

2. На диаграммах профилирования отмечаются как высокоомные, так и низкоомные пропластки малой толщины, размер которых соизмерим с длиной измерительной базы зонда ($H \approx 0,5 \cdot \Delta Z$).

3. Определение границ пласта предпочтительнее проводить по данным измерений короткого зонда. При этом границы пласта пересекают крутые склоны кривой профилирования на среднем уровне между экстремальными значениями разности фаз.

Профилирование пластов большой мощности ($H > Z$)

На рис. 20, а,б приведены кривые профилирования для модели пласта четырехметровой мощности. Здесь рассмотрены высокоомный и низкоомный пласты относительно УЭС вмещающих сред. Данные зондов и параметры сред приведены на рисунках. Все кривые, соответствующие короткому, среднему и длинному зондам, привязаны к точке записи, расположенной между измерительными элементами (центр баз).

Из анализа кривых профилирования следует, что асимптотические значения измеряемого параметра против пласта высокого сопротивления (рис. 20, а) достигаются при следующих условиях в соотношении расстояний между крайними элементами зонда и границами пласта. Влияние вмещающей среды, расположенной ниже пласта, прекращается в момент перехода генераторной катушкой зонда "подол" пласта и перемещения ее выше от этой границы раздела на расстояние, равное длине измерительной базы. При этом расстояние между "кровлей" пласта и крайней измерительной катушкой зонда должно быть не менее половины длины зонда.

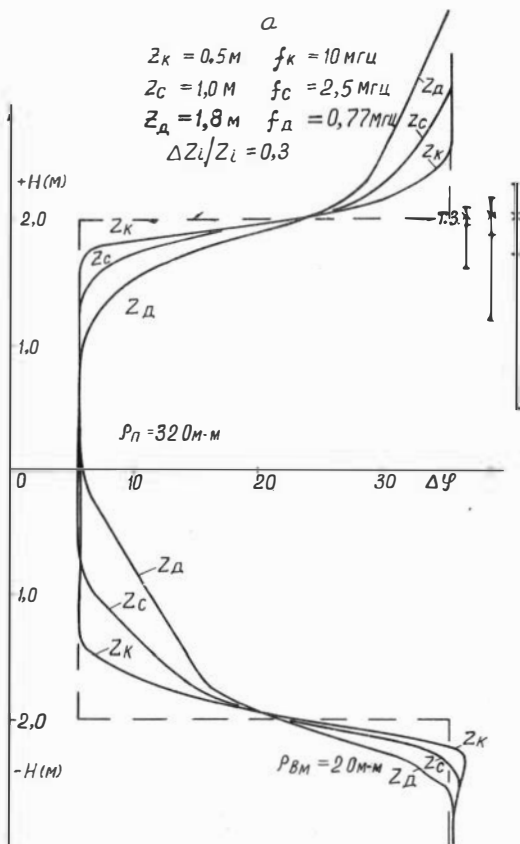
a

$$Z_K = 0,5 \text{ м} \quad f_K = 10 \text{ мгц}$$

$$Z_C = 1,0 \text{ м} \quad f_C = 2,5 \text{ мгц}$$

$$Z_D = 1,8 \text{ м} \quad f_D = 0,77 \text{ мгц}$$

$$\Delta Z_i / Z_i = 0,3$$



б

$$Z_K = 0,5 \text{ м} \quad f_K = 10 \text{ мгц}$$

$$Z_C = 1,0 \text{ м} \quad f_C = 2,5 \text{ мгц}$$

$$Z_D = 1,8 \text{ м} \quad f_D = 0,77 \text{ мгц}$$

$$\Delta Z_i / Z_i = 0,3$$

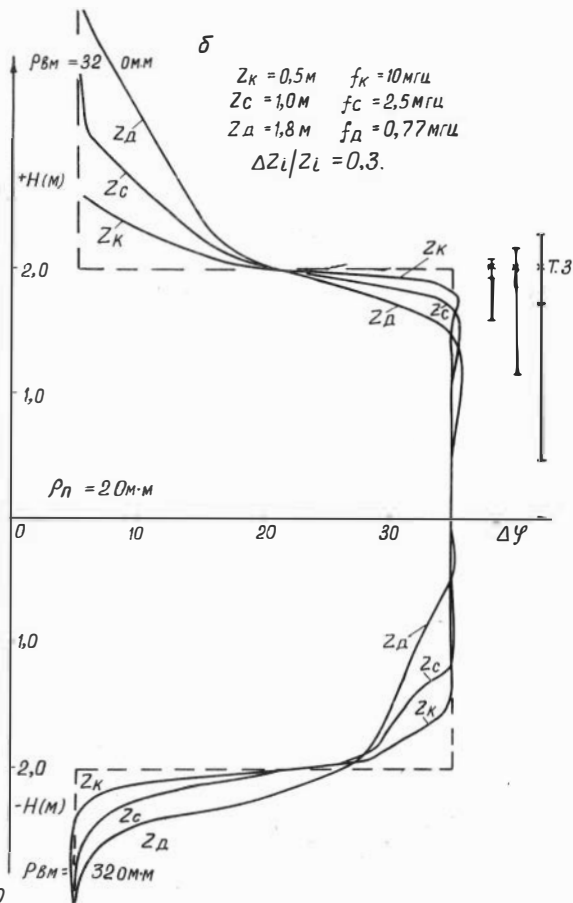


Рис. 20

Такие характерные количественные соотношения между длинами зондов и расстояниями от границ пласта до экстремальных асимптотических показаний кривых профилирования распространяются на все зонды ВИКИЗ. В этой связи асимметрия экстремумов кривых профилирования относительно центра пласта одинакова для всех зондов (15–20%), если равны относительные значения мощности пластов к длине зонда. Следовательно, вмещающие низкоомные породы не оказывают влияния на измерение электропроводности высокоомного пласта, если его мощность, по меньшей мере, в два раза больше длины зонда. Аналогичный вывод справедлив и для низкоомных пластов (рис.20, б).

Отличительной особенностью кривых профилирования, полученных различными зондами ВИКИЗ против пласта с фиксированной (рис.20, а,б) толщиной, является наличие общей точки их пересечения на границах пласта. При этом, если точкой записи является центр измерительной базы зонда, то узел пересечения кривых в "подошве" пласта образуется ближе к экстремуму низкоомного пласта и на уровне середины между максимальным и минимальным показаниями высокоомного пласта. При выходе из пласта узел пересечения кривых размещается в обратном порядке относительно предыдущего случая, а именно: на уровне середины – для низкоомного пласта и ближе к экстремуму показаний во вмещающей среде – для высокоомного. Можно отметить также хорошо выраженные асимптотические показания всех зондов при профилировании пластов (рис. 20, а,б).

На основании анализа кривых профилирования в пластах большой относительной мощности и в пластах с проникновением, по-видимому, можно составить обобщенное представление о возможностях зондирования.

Правомочность такого представления не претендует на строгую завершенность. Вместе с тем, расчеты вертикальных и радиальных характеристик зондов ВИКИЗ позволяют трансформировать обе эти модели в одну – пласт ограниченной мощности с проникновением. В таком представлении без существенных физических противоречий можно ожидать следующее. Показания "коротких" и "средних" зондов в пласте, мощность которого превышает, по меньшей мере, в два раза длину наибольшего зонда ВИКИЗ, будут тождественны УЭС зоны проникновения. При этом показания будут

целиком связаны с закономерностями радиального градиента УЭС. Если показания длинного зонда с предыдущим с ним по длине зондом не выходят на асимптотические значения из-за параметров зоны проникновения, то суждение о количественных характеристиках пласта (УЭС) могут быть, с какой-то долей вероятности, получены по данным палеточной интерпретации.

Результаты математического моделирования в пластах ограниченной мощности с зоной проникновения будут рассмотрены отдельно.

Профилирование пачки пластов различной мощности и электропроводности

На рис. 2I, а,б приведены кривые профилирования пачек пластов различной мощности и электропроводности, полученные для двух изопараметрических зондов различной длины.*

На левой стороне поля рис.2I, а,б расположены кривые "короткого" зонда, на правой – "длинного" зонда. На рис.2I,а изображены "тонкие" пласты, толщина которых изменяется от 0,1 до 0,5 м, а на рис. 2I,б – от 1 до 3 м. Пачки пластов набраны из нескольких серий, которые, в свою очередь, включают пласты одинаковой толщины. Так, например, на рис. 2I,а пачки пластов представлены четырьмя сериями по восемь пластов в каждой (32 пласта). Серии включают следующие мощности пластов: 0,1; 0,2; 0,3; 0,5 м.

На рис.2I,б приведены пачки пластов из трех серий. Мощности пластов в этих сериях равны: 1; 2 и 3 м.

В каждой серии пласты расположены с одинаковым чередованием величины УЭС, значения которых изменяются от 2 до 50 Ом·м.

Анализ кривых профилирования "тонких" пластов коротким зондом ($z_1 = 0,5$ м) позволяет установить высокую расчленяющую способность этого зонда. Вместе с тем, экстремальные значения кривой, против соответствующих тонких пластов, существенно отличаются от истинных. Подобные отклонения находятся в полном соответствии с анализом кривых профилирования тонких одиноч –

*) Расчеты данной модели пластов выполнены по формулам для поля магнитного диполя, приведенным в работе /34/.

$\Gamma 0,35 И_1 0,15 И_2$

$f = 8 \text{ МГц}$

а.

$\Gamma 0,98 И_1 0,42 И_2$

$f = 1,02 \text{ МГц}$

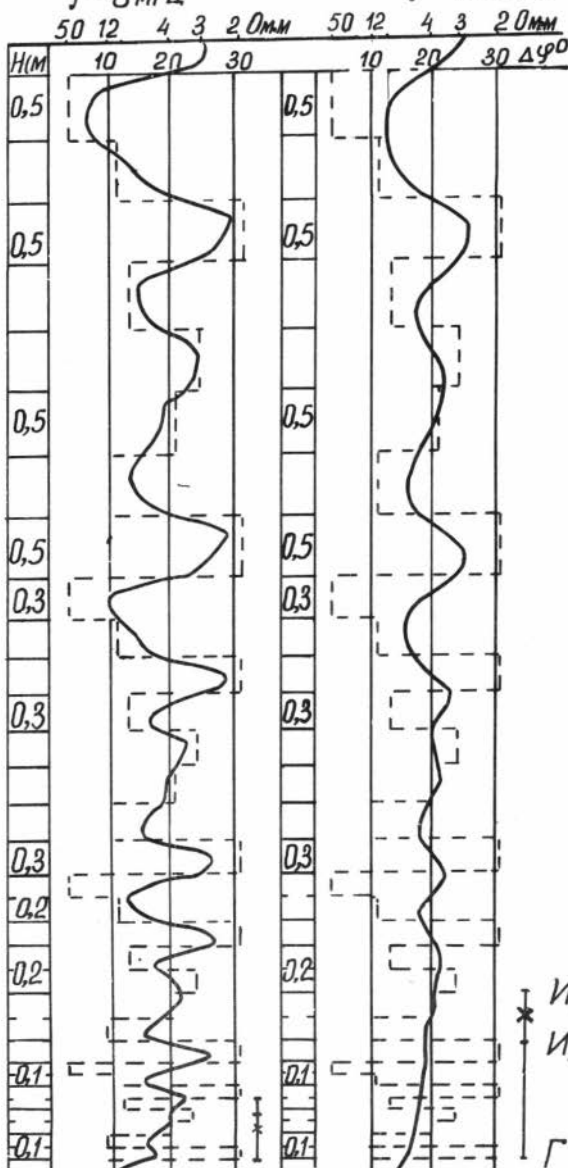


Рис. 21

ВИКИЗ

$\Gamma 0,35 И 0,15 И_2$
 $f = 8 \text{ МГц}$

δ

$\Gamma 0,98 И 0,42 И_2$
 $f = 1,02 \text{ МГц}$

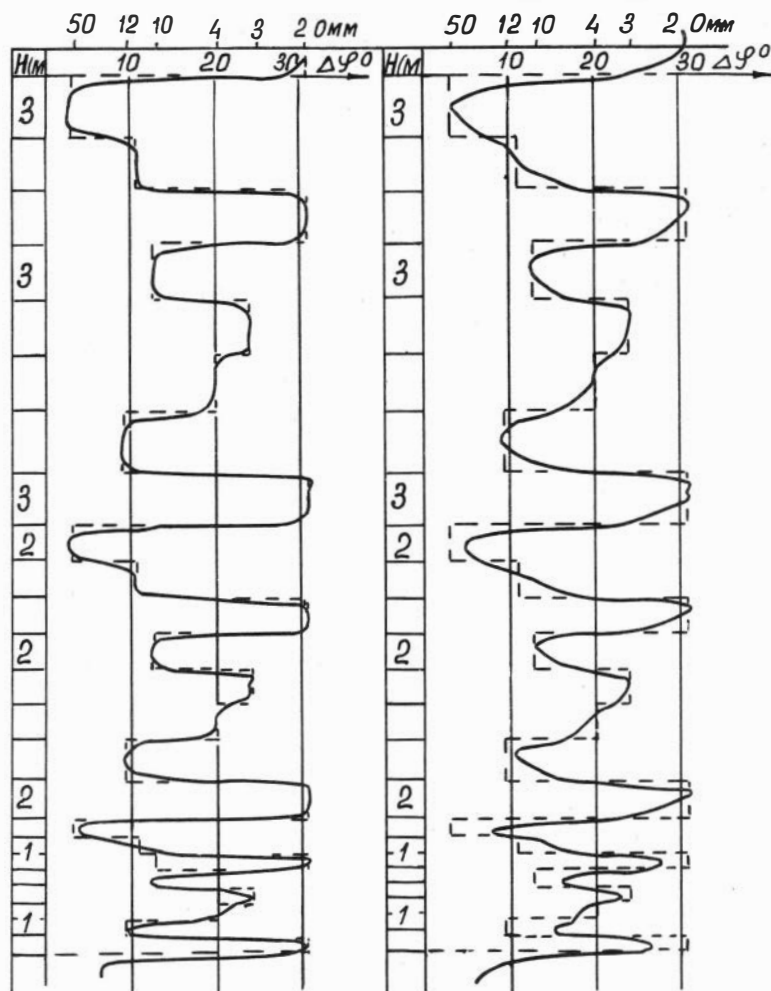


Рис. 21

ных пластов, заключенных в пласты большой мощности. Диаграмма профилирования этой же пачки тонких пластов длинным зондом ($Z_1 = 1,4$ м) дифференцируется значительно слабее, особенно против серии пластов самой малой мощности ($0,1 + 0,2$ м). Однако среднее арифметическое значение УЭС этой части пластов (общая толщина — $2,4$ м) совпадает с данными диаграммы профилирования. Таким образом, диаграмма пачки тонких пластов, нерасчлененных детально, регистрируется усредненным значением измеряемого параметра по всей пачке пластов.

Анализ кривых профилирования более мощных пластов (рис. 21, б) показывает, что короткий зонд ($Z_1 = 0,5$ м) обеспечивает истинные значения разности фаз во всех пластах ($Z_1 = 1; 2$ и 3 м) с УЭС менее 50 Ом·м. При этом экстремальные показания кривой профилирования в пластах мощностью 2 м и более выписываются линиями почти на всем интервале мощности пласта. Против пластов метровой толщины кривые профилирования достигают истинных значений разности фаз экстремумами, показания которых соответствуют однородной среде с электропроводностью пласта.

Длинный зонд в пачке этих же пластов обеспечивает истинные значения измеряемого параметра в случае относительно небольших значений УЭС пластов ($\rho < 8$ Ом·м) с мощностью два и более метра. В пластах толщиной в два раза большей длины зонда ($H=3$ м) показания разности фаз совпадают с соответствующими значениями в однородной среде с УЭС пласта вплоть до 50 Ом·м.

Таким образом, экстремальные значения кривых, а также участки с постоянными показаниями на некотором интервале, совпадающем с направлением перемещения зонда, являются основными данными измерений для оценки УЭС пластов.

7. АППАРАТУРА ВИКИЗ

Аппаратура ВИКИЗ предназначена для изучения распределения удельного сопротивления в радиальном от скважины направлении. Процесс зондирования осуществляют, измеряя разность фаз с помощью пяти зондов различной длины, каждый из которых работает на соответствующей частоте. Каждый зонд в совокупности с той частью электронной схемы, которая необходима для работы этого зонда, будем в дальнейшем называть измерительным каналом или

просто каналом. Таким образом, аппаратура ВИКИЗ представляет собой пятиканальное устройство, причем при работе одного из каналов, остальные каналы отключены. В процессе каротажного зондирования все пять каналов работают поочередно. Время работы одного канала не превышает 20 мс. Таким образом, два соседних измерения по одному и тому же каналу отстоят по времени друг от друга не более, чем на 100 мс. Это дает возможность проводить зондирование в процессе движения скважинного прибора по стволу скважины со стандартной для индукционного каротажа скоростью, не превышающей 2000 м/час. Кроме зондирования, в аппаратуре предусмотрен режим обычного индукционного каротажа, при котором постоянно работает один из пяти каналов. При этом номер работающего канала задает оператор с поверхности. Также с поверхности осуществляют переход от режима одноканального каротажа к пятиканальному каротажному зондированию и обратно.

Рассмотрим устройство и работу всех составных частей аппаратуры ВИКИЗ. Как и большинство типов каротажной аппаратуры, данная аппаратура содержит скважинный прибор и наземную часть. В скважинном приборе, по аналогии с приборами индукционного каротажа, можно выделить зондовое устройство, блок генераторов высокой частоты и измерительный блок.

Зондовое устройство

Зондовое устройство состоит из пяти трехэлементных геометрически подобных зондов. Каждый зонд выполнен из одной генераторной и двух измерительных катушек, которые размещены снизу вверх, соответственно. Длины зондов установлены в соответствии с изопараметром $z^2 f = 3,5 \cdot 10^6$. Конструктивно зонды состоят из двух основных узлов: стержня, на котором закреплены катушки, и защитного кожуха, изготовленного из непроводящего материала. В связи со значительной длиной (2,5 м) зондовое устройство конструктивно оформлено в самостоятельный блок, сочленяемый при работе с электронным блоком прибора.

Конструктивное выполнение зондового устройства ВИКИЗ имеет ряд особенностей, которые состоят в следующем.

1. Генераторы ВЧ размещены в нижней части зондового устройства на значительном удалении от измерительного блока. Такое конструктивное решение позволяет ослабить емкостные и индуктивные связи между измерительными и генераторными цепями зондов по кабелям, с помощью которых элементы зондов соединяются с соответствующими блоками.

2. В зондах ВИКИЗ осуществлены специальные меры по электрическому экранированию всех элементов зондового устройства (катушек, проводов, разъемов и др.).

3. С целью уменьшения емкостной связи между измерительными и генераторными катушками по "транзитным" линиям, в провода линий электропитания включены ВЧ дроссели, размещенные в центральной части зондового стержня. Все провода имеют жесткое крепление в специальных пазах стержневой основы зондов.

4. Генераторные катушки зонда навиты на стержень с шагом, равным двойному диаметру наматываемого провода.

5. Измерительные катушки выполнены из двух секций, каждая из которых соединена с измерительным устройством отдельным кабелем. За счет этого удалось повысить собственную резонансную частоту приемных цепей. Этот способ обеспечивает высокую стабильность фазовых характеристик измерительных катушек на соответствующих рабочих частотах.

Защитные кожухи для зондовых устройств высокочастотного электромагнитного каротажа могут быть трех основных конструкций: монолитной, маслonaполненной и полой. Самой простой и удобной является полая конструкция зондового устройства, однако следует подчеркнуть настоятельную необходимость поиска прочных изоляционных материалов для охранных кожухов зондов, способных выдерживать высокие давления и температуры.

Генераторный блок

В состав блока генераторов высокой частоты входят кварцевый генератор, блок рабочих частот, схема управления и пятиканальный усилитель мощности (рис. 22).

Сигнал высокой частоты, вырабатываемый кварцевым генератором, поступает в блок рабочих частот. На выходе этого блока получают пять рабочих частот, необходимых для работы зондового устрой-

ства. Схема управления подает на усилитель мощности сигнал той или иной рабочей частоты, в зависимости от номера канала, который должен быть включен в данный момент времени. Нагрузкой пятиканального усилителя мощности служат пять генераторных катушек зондового устройства. Усилитель обеспечивает во всех генераторных катушках примерно равные токи ($\sim 0,5A$).

Измерительный блок

Измерительный блок состоит из усилителей высокой частоты, блока гетеродинных частот, смесителей, схемы управления, тракта низкой частоты, цифрового измерителя разности фаз, приемопередатчика и блока управления (рис.23). В состав измерительного блока входит также блок питания (на рисунке не показан).

Сигналы с измерительных катушек подают на пять пар усилителей высокой частоты. Усиленные сигналы поступают на пять пар смесителей. На эти же смесители подают напряжения частот, которые получают в блоке гетеродинных частот. Разница между гетеродинными и соответствующими рабочими частотами равна 15 кГц – именно с такой частотой получают сигналы на выходе смесителей. Тракт низкой частоты выполнен общим для всех пяти каналов. Поэтому в задачу схемы управления входит подключение к тракту низкой частоты той пары смесителей, которая соответствует работающему в данный момент измерительному каналу. В тракте низкой частоты сигналы усиливают и приводят к удобной форме для последующей цифровой обработки. Сформированные сигналы поступают в цифровой измеритель разности фаз. Число, соответствующее измеренной разности фаз, в двоичном коде поступает в передатчик и далее, в наземный блок.

Приемник скважинного прибора служит для приема от наземного блока кодированных команд, которыми управляют всей работой прибора. Эти команды поступают в блок управления, расшифровываются и далее подаются на схемы управления генераторного и измерительного блоков.

Блок питания состоит из преобразователя, трансформатора, набора выпрямителей и стабилизаторов. На выходе блока получают все напряжения, необходимые для питания схем скважинного прибора.

Наземный блок

С помощью наземного блока осуществляют: 1) управление работой аппаратуры; 2) прием, обработку и регистрацию поступающей из скважинного прибора информации; 3) питание всей аппаратуры.

Структурная схема наземного блока показана на рис. 24 (без блока питания).



Рис. 22

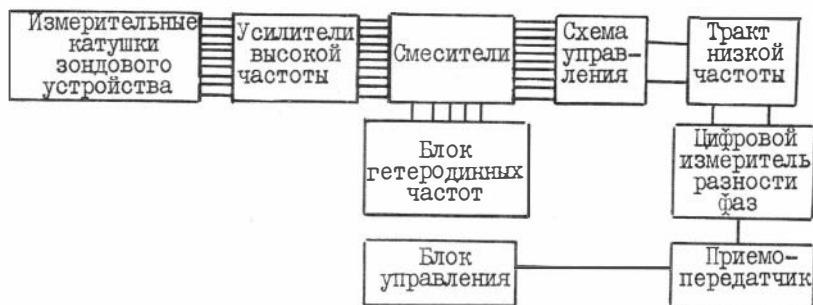


Рис. 23

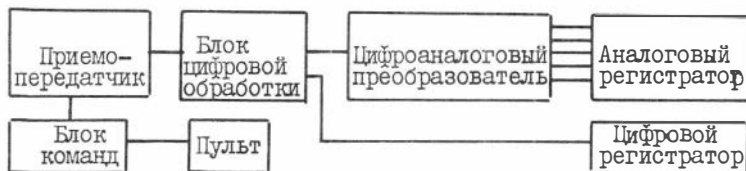


Рис. 24

Работа наземного блока строится в следующем порядке. С помощью набора переключателей, расположенных на пульте, оператор задает определенный режим работы всей аппаратуры. Как отмечалось

ранее, это может быть режим пятиканального зондирования или режим одноканального индукционного каротажа.

Переключатели пульта связаны с блоком команд, который, в соответствии с выбранным режимом работы, формирует кодированные команды для управления работой скважинного прибора. Эти команды поступают в передатчик наземного блока и далее, по кабелю, в скважинный прибор.

После проведения измерения в скважинном приборе, в наземный блок, по кабелю, приходит информация о величине разности фаз. Эта информация представлена в виде числа в двоичном коде. Число поступает в приемник наземного блока и затем - в блок цифровой обработки. Обработанную информацию, в виде обычного десятичного числа, подают на цифровой регистратор. В качестве такого регистратора используют цифровой индикатор для визуального контроля за работой аппаратуры. Кроме того, возможно подключение магнитофона для записи информации на магнитную ленту. Для представления результатов измерений в виде стандартной каротажной диаграммы число, полученное от блока цифровой обработки, подают на цифро-аналоговый преобразователь. В этом преобразователе осуществляется пропорциональный перевод численного значения разности фаз в соответствующую величину постоянного напряжения, которое подают в один из каналов аналогового регистратора. Для аналоговой записи может быть использован любой стандартный каротажный прибор или группа приборов, обеспечивающих одновременную запись, по крайней мере, пяти каротажных кривых.

Питание всей аппаратуры осуществляют с помощью соответствующего источника, входящего в состав наземного блока. Источник питания аппаратуры ВКИЗ построен по известной схеме и обеспечивает набор постоянных напряжений для питания схем наземного блока. Кроме того, имеется стабилизированный источник постоянного тока высокого напряжения для питания скважинного прибора.

Вся электронная часть аппаратуры ВКИЗ выполнена на базе полупроводниковых элементов. Применение в скважинном приборе данной элементной базы, на основе кремния, обеспечивает его работоспособность до температуры $+120^{\circ}\text{C}$. Использование транзисторов и микросхем позволило, несмотря на сложность аппаратуры, выполнить весь монтаж схем в достаточно малом объеме. Это обстоятельство дает возможность разместить электронную часть

скважинного прибора в сосудах Дьюара и, тем самым повысить предельно допустимую температуру окружающей среды до $+150^{\circ}\text{C}$ и выше, в зависимости от продолжительности непрерывной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методические разработки высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования позволили установить новые возможности в изучении электрических характеристик горных пород. К ним следует отнести прежде всего выделение пластов-коллекторов с количественной оценкой электропроводности в зоне проникновения и незатронутой проникновением части пласта, в том числе в пластах относительно небольшой мощности. При соответствующих условиях в соотношении между мощностью пласта и длинами зондов ВЛИЗ представляется возможность изучать радиальный градиент, а при наличии в пласте-коллекторе области повышенного скопления минерализованных вод (за счет первоочередного отеснения углеводородов в глубь пласта) появляется возможность изучать это явление прямыми измерениями в скважине.

Определенный набор зондов различной длины с изопараметрическими характеристиками, открывает широкие возможности ВЛИЗ в решении многих важных задач промышленной геофизики. В частности, изопараметрический комплекс парных зондов, при определенном способе обработки измеряемых характеристик поля, позволяет исключить влияние электропроводности среды на измерение диэлектрической проницаемости горных пород. В этом случае, соответствующая чувствительность аппаратуры позволит расширить возможности индукционных способов при изучении высокоомных пород, исследование которых затруднено существующими методами электрокаротаж.

Принципы аппаратурного решения ВЛИЗ, основанные на последних достижениях полупроводниковой электроники, которые широко используются в практике электронного приборостроения, по-видимому, позволят повысить надежность и точность измерений, упростить технологические приемы при массовом производстве, расширить термобаростойкость приборов в определенном временном интервале при использовании соответствующих защитных оболочек.

В целом ВИКИЗ отличают следующие важнейшие свойства и характеристики.

1. Высокая "послойная" радиальная чувствительность к электрическим неоднородностям (разрешающая способность), которая позволяет прямо по кривой зондирования сделать оценку радиального градиента удельного электрического сопротивления в пластах-коллекторах.

2. Превосходная локальность зондирования, при которой измерения радиального градиента УЭС не зависят от вмещающих пород, при мощности пласта в два раза больше длины зонда.

3. Широкий диапазон измерений УЭС горных пород — от долей единицы до первых сотен Ом м. При этом прямая пропорциональная связь между измеряемой характеристикой поля и электропроводностью пород устанавливается в низкоомных разрезах.

4. Фокусировка частотная, сопутствующая измерению относительных характеристик поля (разность фаз, отношение амплитуд и т.п.) и реализуемая с помощью трехэлементных зондов, позволяет значительно ослабить влияние параметров скважины и получать результаты измерений, главным образом обусловленные радиальным градиентом УЭС в пласте.

5. Различная глубинность исследования и одновременная независимость измеряемых характеристик электромагнитного поля от изменений зондирующих параметров установки обеспечены благодаря изопараметрическому сочетанию длин геометрически подобных зондов с частотами токов возбуждения.

Можно отметить относительную простоту конструктивного устройства зондов. Минимальное количество элементов в одном зонде (одна возбуждающая катушка и две измерительные) позволяет разместить все катушки пяти — шести зондов, с учетом различных их размеров, на одной стержневой основе. При этом выбором соответствующего коэффициента геометрического подобия зондов можно оптимизировать расположение одноименных катушек зондов в соответствии с требованиями о взаимном не влиянии через "паразитные" связи.

Весь опыт предыдущих разработок в области высокочастотных электромагнитных методов каротажа, начатый впервые в нашей стра-

не и широко разрабатываемый в настоящее время за рубежом, и прежде всего в США, показывает, что нужно усилить аппаратные разработки на новой качественной основе. Разработка и совершенствование новых методов электрокаротажа позволит существенно повысить производительность и эффективность исследования скважин, а в ряде случаев решать такие задачи, которые недоступны существующим методам.

Вместе с тем можно согласиться, что "новый метод, как бы совершенен он ни был, всегда имеет свои ограничения и оставляет много нерешенных вопросов" (22, с.207).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. ОРЛОВ Л.И., РУЧКИН А.В., СВИХЛУШИН Н.М. Влияние промывочной жидкости на физические свойства коллекторов нефти и газа. — М.: Недра, 1976.—89 с.

2. ЯРМОХОВ И.Г., ЛОГИНОВ И.В., СОХРАНОВ Н.М., ВЕНДЕЛЫШТЕЙН Б.Ю. Численное решение задачи формирования зоны проникновения. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 89. М.: Недра, 1977, с.135—142.

3. ПЛЮСНИН М.И. Индукционный каротаж. — М.: Недра, 1968.—142 с.

4. ДОЛЛЬ Г.Г. Теория индукционного метода исследования разрезов скважин и его применение в скважинах, пробуренных с глинистым раствором на нефти. — В кн.: Вопросы промышленной геофизики. М.: Гостоптехиздат, 1957, с.252—274.

5. АНТОНОВ Ю.Н., ПРИВОРОТСКИЙ Б.И. Высокочастотный индукционный каротаж. — Новосибирск: Наука, 1975.—260 с.

6. ДАЕВ Д.С. Высокочастотные электромагнитные методы исследования скважин. — М.: Недра, 1974.—190 с.

7. КОМАРОВ С.Г. Каротаж по методу сопротивлений (интерпретация). — М.: Гостоптехиздат, 1950.—229 с.

8. ВЕНДЕЛЫШТЕЙН Б.Ю., РЕЗВАНОВ Р.А. Геофизические методы определения параметров нефтегазовых коллекторов. — М.: Недра, 1978.—318 с.

9. Пат.3259837 (США). Dresser. Industries Inc./Oshry Howard J. — Опубл. 05.07.66.

10. А.с.439216 (СССР). Способ индукционного каротажа/С.М.Аксельрод и др. — Б.И., 1974, № 29.

11. А.с.572736 (СССР). Способ индукционного каротажа/Ю.Н.Антонов.—Опубл. в Б.И., 1977, № 34.

12. ГАСАНЕНКО Л.Б. Изопараметрическое зондирование.— В кн.: Ученые записки ЛГУ, № 278, 1959, с.185—188.

13. АНТОНОВ Ю.Н. Высокочастотные индукционные методы электрометрии нефтяных и газовых скважин.—Геол. и геофиз., 1978, № 4, с.86—95.

14. ДУБМАН Л.И. Петрофизическое обоснование диэлектрического метода исследования скважин (на примере Мезозойских отложе-

ний Среднего Приобья). Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. — Новосибирск, 1977. — 16 с.

15. ЗИНЧЕНКО В.С., ДАЕВ Д.С. Опыт применения двухчастотного волнового диэлектрического каротажа в гидрогеологических скважинах. — В кн.: Разведочная геофизика, Вып. 75. — М.: Недра, 1977, с. 97—104.

16. НИКИТИНА В.Н. Общее решение осесимметрической задачи теории индукционного каротажа. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1960, № 4, с. 607—616.

17. НЕЙМАН Е.А., МИРОШНИЧЕНКО Е.М. Выяснение характера распределения удельного электрического сопротивления в зоне проникновения фильтра бурового раствора в пласт. — В кн.: Вопросы промысловой геофизики. М.: Гостоптехиздат, 1955, с. 120—125.

18. ДАХНОВ В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. — М.: Недра, 1972. — 365 с.

19. ТАБАРОВСКИЙ Л.А. Применение метода интегральных уравнений в задачах геоэлектрики. — Новосибирск.: Наука, 1975. — 140 с.

20. ЭПОВ М.И. Исследование возможностей индукционных фокусирующих систем каротажа при изучении анизотропных пластов: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Новосибирск, 1978. — 16 с.

21. АКСЕЛЬРОД С.М. Высокочастотные методы исследования скважин (индукционный и диэлектрический). М.: Гостоптехиздат, 1962. — 45 с.

22. МАРТЕН М. Современное состояние использования методов электрического и радиоактивного каротажа. — В кн.: Промысловая геофизика. Вып. 3. М.: Гостоптехиздат, 1960, с. 95—215.

23. ПИРСОН С.Д. Справочник по интерпретации данных каротажа. — М.: Недра, 1966. — 413 с.

24. ПИРСОН С.Д. Учение о нефтяном пласте. — М.: Гостоптехиздат, 1961. — 569 с.

25. АНТОНОВ Ю.Н. К обоснованию высокочастотного индукционного каротажа для изучения неоднородных пластов-коллекторов. — В кн.: Электромагнитные методы исследования скважин. — Новосибирск: Наука, 1979. (В печати).

26. ДМИТРИЕВ В.И. Осесимметричное электромагнитное поле в цилиндрически-слоистой среде. — Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1972, № II. с. 56—61.

27. ЯНЕНКО Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. – Новосибирск: Наука, 1967. – 195 с.
28. ДАХНОВ В.Н. О влиянии глинистости на величину удельного электрического сопротивления и параметра пористости песчаных коллекторов. – В кн.: Применение методов промышленной геофизики при изучении газоносных коллекторов. М.: Гостоптехиздат, 1962, с.81–96.
29. ЗВЕРЕВ Г.Н., КУСОВ В.А., БАТАНИН В.И. Магнитный диполь в трехслойных проводящих средах. – Изв.АН СССР. Сер.Физика Земли, 1965, № 9, с.63–72.
30. Переменное магнитное поле вертикального магнитного диполя в задачах индукционного каротажа (альбом). Новосибирск, 1965. 140 палеток.
31. ДАЕВ Д.С., ДЕНИСОВ С.Б., КОСТИН А.И. Измерение удельного сопротивления пород методом волнового каротажа проводимости. – Проблемы нефти и газа Тимени. Тимень, 1977, вып. 33, с.3–7.
32. АНТОНОВ Ю.Н., АКСЕНОВА Л.В. и др. К обоснованию ди-электрического индуктивного каротажа. – В кн.: Электромагнитные поля в электроразведке. Новосибирск.: Наука, 1970, с.70–160.
33. КРИВОПУЦКИЙ В.С. Исследование радиальных и вертикальных характеристик зондов индукционного каротажа, расположенных симметрично и несимметрично относительно оси скважины: Автореф. дис. ... канд.геол.-минерал.наук. – Новосибирск, 1974. – 25 с.
34. ТАБАРОВСКИЙ Л.А. Рекуррентные соотношения для расчета электромагнитных полей в многослойных средах. – В кн.: Электромагнитные методы исследования скважин. – Новосибирск: Наука, 1979. (В печати).

О Г Л А В Л Е Н И Е

В В Е Д Е Н И Е	3
1. СПОСОБЫ КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАДИАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ	6
2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ЗОНДОВ ВИКИЗ	II
3. ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ ЗОНДОВ ВИКИЗ	15
Выбор максимальной частоты возбуждающего тока	19
Выбор "короткого" зонда	21
Электрические параметры среды и "максимальный" изо- параметр	22
Принцип геометрического подобия зондов	25
Условия изопараметричности магнитных моментов	26
4. ВЛИЯНИЕ СКВАЖИНЫ НА ЗОНДЫ ВИКИЗ	28
Физические основы высокочастотной "фокусировки"	28
Моделирование зондов в двухслойной цилиндрически- слоистой среде	29
Скважина с буровым раствором на нефтяной основе (раствор "не проводящий" электроток)	34
Скважина с низкоомным буровым раствором относительно удельного электрического сопротивления пласта	34
Зависимость характеристик поля от смещения зондов к стенке скважины	37
5. ЗОНДЫ ВИКИЗ В МОДЕЛЯХ СРЕД СО СЛОЖНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ РАДИАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ	39
К обоснованию моделирования перехода промытой зоны пласта-коллектора ступенчатыми функциями	40
О связи электропроводности среды с интерпретируемым параметром	46
Радиальные характеристики зондов в трехслойной цилиндрически-слоистой модели среды	49
О палетках ВИКИЗ для определения параметров зоны проникновения и пласта	56
Сопоставление характеристик БКЗ, ИБКЗ и ВИКИЗ	58

Моделирование "кольцевой" зоны повышенной электро- проводности	64
6. ЗОНДЫ ВИКИЗ В МОДЕЛЯХ СРЕД С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ ГРАНИЦАМИ РАЗДЕЛА	72
Профилирование границы между пластами неограниченной мощности	75
Профилирование "тонких" пластов ($H < Z$)	80
Профилирование пластов большой мощности ($H > Z$)	85
Профилирование пачки пластов различной мощности и электропроводности	88
7. АППАРАТУРА ВИКИЗ	91
Зондовое устройство	92
Генераторный блок	93
Измерительный блок	94
Наземный блок	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
ЛИТЕРАТУРА	100

Технический редактор Л.А. Жукова

Подписано к печати 3.VIII.1979г. МН 06076.
Бумага 60x84/16. Печ.л. 6,5. Уч.-изд.л. 6,0.
Тираж 400. Заказ 256. Цена 90 коп.

Институт геологии и геофизики СО АН СССР
Новосибирск, 90. Ротапринт.