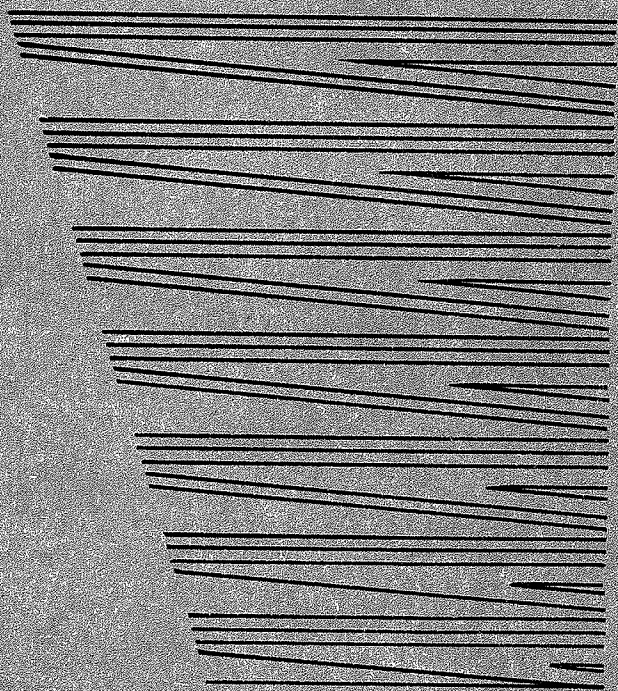
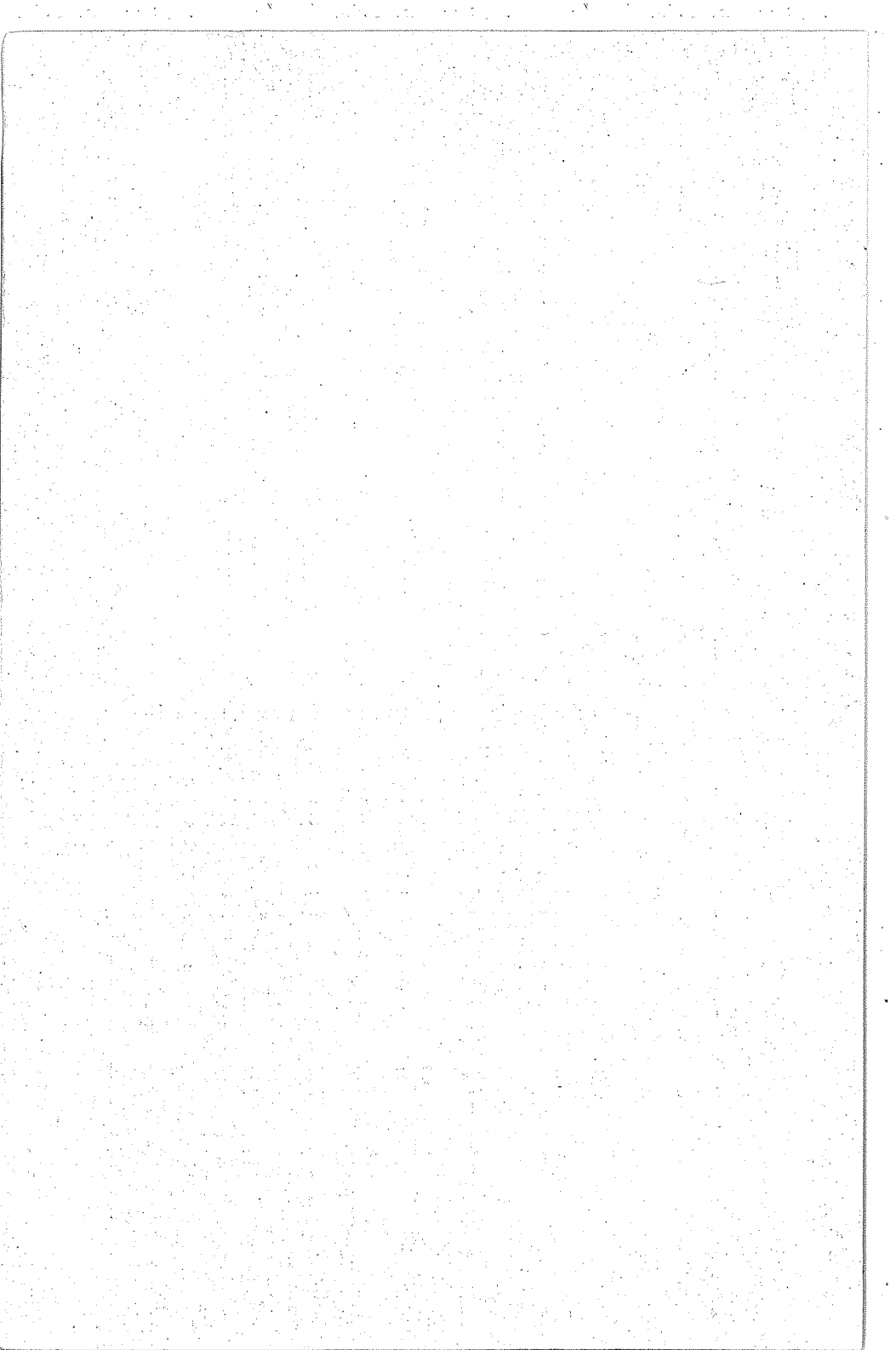


Г. Е. ЯКОВЛЕВ

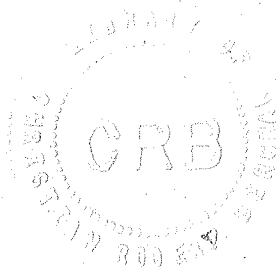
ИССЛЕДОВАНИЕ СКВАЖИН БОЛЬШИМИ ГРАДИЕНТ- ЗОНДАМИ





Г. Е. ЯКОВЛЕВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ
СКВАЖИН
БОЛЬШИМИ
ГРАДИЕНТ-
ЗОНДАМИ**



МОСКВА „НЕДРА” 1990

ББК 26.2
Я 46
УДК 550.832.7

Рецензент д-р геол.-минер. наук *Б.Ю. Вендельштейн*

Яковлев Г.Е.

Я 46 Исследование скважин большими градиент-зондами. — М.: Недра, 1990. — 176 с.: ил.

ISBN 5-247-00906-1

Обосновано использование четырехэлектродных градиент-зондов большого размера для увеличения глубинности исследования. Рассмотрены факторы (параметры разреза, скважины, зонда), влияющие на результаты измерений. Описаны аппаратура и методика работ. Приведены примеры эффективного применения градиент-зондов большого размера для определения характера насыщения коллекторов с глубокими зонами проникновения промывочной жидкости.

Для геофизиков и геологов-нефтяников производственных организаций.

Я $\frac{1804050000 - 224}{043(01) - 90}$ 75 -- 90

ББК 26.2

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ (ПРАКТИЧЕСКОЕ) ИЗДАНИЕ

Яковлев Геннадий Евгеньевич

ИССЛЕДОВАНИЕ СКВАЖИН БОЛЬШИМИ ГРАДИЕНТ-ЗОНДАМИ

Заведующий редакцией *Е.Г. Першина*, редактор издательства *Т.К. Рубинская*, художественный редактор *В.В. Шутько*, технические редакторы *Н.С. Анашкина*, *Л.А. Миронова*, корректор *М.В. Дроздова*, оператор *О.М. Карбанова* ИБ № 6525

Подписано в печать с репродуцируемого оригинал-макета 13.06.90. Т — 05199. Формат 60×88 $\frac{1}{16}$. Бум. офсетная № 2. Гарнитура Пресс-роман. Печать офсетная. Усл.-печ.л. 10,78. Усл.кр.-отт. 11,15. Уч.-изд.л. 12,36. Тираж 1340 экз. Зак. № 2842 /723—3. Цена 60 коп. Набор выполнен на наборно-пишущей машине.

Ордена „Знак Почета” издательство „Недра”.
125047 Москва, пл. Белорусского вокзала, 3.

Московская типография № 9 НПО “Всесоюзная книжная палата” Госкомитета СССР по печати.
109033, Москва, Волочаевская ул., 40

ISBN 5-247-00906-1

© Г.Е. Яковлев, 1990

ВВЕДЕНИЕ

Высокие темпы развития топливно-энергетической базы страны ставят задачу существенного повышения информативности геофизических методов исследования скважин (ГИС), являющихся основным способом изучения геологических разрезов, вскрытых бурением. При этом одной из наиболее сложных задач, стоящих перед промысловой геофизикой, является определение характера насыщения коллекторов, что связано, в частности, с образованием в них в ряде случаев глубоких зон проникновения промывочной жидкости. Особенно часто это наблюдается в коллекторах со сложной структурой порового пространства, в районах с аномально низкими пластовыми давлениями (АНПД), при увеличении глубины скважин свыше 3 тыс. м, на поздней стадии эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, при вскрытии продуктивных отложений на промывочной жидкости с высокой водоотдачей, а также при использовании в качестве последней естественных водных суспензий (ЕВС) с добавками поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Наличие глубоких зон проникновения промывочной жидкости приводит к пропуску нефтеносных пластов, ложным заключениям о нефтенасыщении водоносных пластов, ошибкам в определении положения водонефтяного контакта (ВНК) и т.п., поскольку используемые методы ГИС обладают недостаточной глубиной исследования для надежного определения типа флюида, насыщающего неизмененную проникновением часть пластов-коллекторов. В свою очередь это вызывает задержку ввода в эксплуатацию новых скважин, увеличение продолжительности их испытаний, что, в конечном счете, существенно повышает стоимость геологоразведочных работ на нефть и газ. Поэтому чрезвычайно актуальной является разработка методов ГИС, обладающих большей, по сравнению с существующей, глубиной исследования.

По своим физическим основам к наиболее глубинным методам промысловой геофизики относится электрометрия, которая при наличии проникновения промывочной жидкости является, по существу, единственной, позволяющей оценивать характер флюида, насыщающего пласты-коллекторы. Поэтому более перспективным представляется совершенствование методов электрометрии.

Повышение глубинности исследования путем увеличения размеров потенциал-зонда было успешно использовано А.Н. Африкяном и А.М. Залуцким в Волгоградском Поволжье для исследования мощных однородных по сопротивлению толщ. Однако для изучения разрезов, сложенных пластами ограниченной мощности, потенциал-зонды большого размера оказались непригодными из-за низкой расчленяющей способности.

Сопоставление характеристик разных методов электрометрии показало, что существенного увеличения глубинности исследования при сохранении высокой разрешающей способности по вертикали можно добиться путем использования градиент-зондов большого размера с малыми разносами между измерительными электродами. Однако при увеличении размера трехэлектродного градиент-зонда пропорционально увеличивается и интервал, на котором сказывается экранирование электрическими неоднородностями разреза, расположенными в районе питающих электродов. Для уменьшения амплитуды экранирования было предложено вместо трехэлектродных использовать четырехэлектродные градиент-зонды типа АМNB. Наличие в зонде второго питающего электрода заставляет ток, вытекающий из электрода А, замыкаться на электрод В, препятствуя тем самым его рассеиванию на границах раздела сред с различными удельными сопротивлениями, что приводит к резкому снижению влияния экранирования и упрощенной конфигурации кривых КС.

Следует отметить, что четырехэлектродные градиент-зонды сами по себе не являются новшеством. Они упоминались в одной из работ Г.Г. Долля еще в 1934 г., а также вошли в классификацию зондов электрометрии, предложенную В.Н. Дахновым в 1955 г. Однако в то время из-за отсутствия многожильного кабеля и недостаточно высокого уровня развития измерительной техники четырехэлектродные градиент-зонды не нашли практического применения. Невозможность технической реализации таких зондов привела к тому, что работы по изучению их характеристик не проводились, несмотря на явные преимущества их перед трехэлектродными.

Максимальный положительный эффект от применения четырехэлектродных градиент-зондов достигается при большом расстоянии между питающими электродами. Тогда около точки записи образуется достаточно обширная область квазиоднородного электрического поля, в которой эквипотенциальные поверхности при удалении от границ пласта являются плоскостями, практически нормальными к оси скважины, вследствие чего падение потенциала на интервале MN в пласте такое же, как и на оси скважины. Это, наряду с малым (порядка 0,5 м) расстоянием между измерительными электродами, обеспечивает высокую дифференциацию регистрируемых диаграмм КС.

В слоистом разрезе, представленном часто чередующимися пластинами разного удельного сопротивления, который в первом приближении можно аппроксимировать однородной анизотропной средой, токовые линии питающего диполя и область квазиоднородного электрического поля вытягиваются по радиусу от скважины тем больше, чем больше коэффициент микроанизотропии; происходит своеобразная фокусировка тока за счет того, что продольная проводимость анизотропной среды больше поперечной. В результате этого глубинность исследова-

ния в слоистом разрезе, с которым обычно приходится сталкиваться при измерениях большими установками, увеличивается по сравнению с однородной изотропной средой.

Большое расстояние между питающими электродами четырехэлектродного градиент-зонда при сохранении малых разносов MN приводит к снижению измеряемых разностей потенциалов до первых десятков микровольт. Выделить полезные сигналы такой величины на фоне весьма значительных помех, а также измерить их с помощью общепринятой методики регистрации кривых КС не представляется возможным. Поэтому для технической реализации измерений в скважинах четырехэлектродными градиент-зондами большого размера необходима специальная аппаратура, совместимая с современными промыслово-геофизическими станциями.

В предлагаемой работе содержатся некоторые положения теории электрометрии четырехэлектродными градиент-зондами большого размера, анализ основных факторов, влияющих на результаты измерений, методика интерпретации получаемых материалов, краткое описание применяемой аппаратуры, а также примеры решения задачи по определению характера насыщения коллекторов разного типа при наличии в них глубокого проникновения промывочной жидкости.

Теория метода исследования скважин четырехэлектродными градиент-зондами большого размера базируется на основополагающих работах Л.М. Альпина, В.Р. Бурсиана, В.Н. Дахнова, Г.Г. Долля, А.И. Заборовского, С.Г. Комарова, А.Н. Краева, А.А. Петровского и др., а техническое воплощение — на современных достижениях радиоэлектроники.

Опробование предлагаемого метода электрометрии проводилось главным образом на месторождениях Татарии, разрез осадочной толщи которых на 80 % состоит из карбонатных отложений. Поэтому все примеры по определению геологической эффективности четырехэлектродных градиент-зондов большого размера приведены именно для этого региона. Однако это не исключает экстраполяции полученных результатов на другие нефтегазоносные районы и другие типы коллекторов (например, вулканогенно-осадочные), характеризующиеся глубокими зонами проникновения промывочной жидкости.

Глава I

ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГРАДИЕНТ-ЗОНДОВ БОЛЬШОГО РАЗМЕРА

§ 1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕНИЯ КОЛЛЕКТОРОВ СО СЛОЖНЫМ СТРОЕНИЕМ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА

Основными задачами, стоящими перед промыслово-геофизическими методами исследования в нефтегазоносных районах, являются расчленение разрезов, выделение в них пластов-коллекторов и оценка их емкостных и фильтрационных параметров, а также установление характера насыщающего коллектор флюида и определение коэффициента нефтегазонасыщения. Существующим комплексом методов промысловой геофизики эти задачи достаточно успешно решаются для относительно простых типов гранулярных, главным образом терригенных, коллекторов. В то же время во многих нефтегазоносных районах все более возрастает роль сложных коллекторов, к которым относятся некоторые типы терригенных пород со сложным минеральным составом и строением порового пространства, вулканогенные и вулканогенно-осадочные коллекторы. Но наиболее широко распространенными сложными коллекторами являются карбонатные, характеризующиеся разнообразием и резкой изменчивостью как по площади, так и по разрезу литолого-петрографических, структурно-текстурных и коллекторских свойств. Эти особенности резко снижают эффективность их изучения существующими геофизическими методами, требуя, в зависимости от конкретных геолого-геофизических условий, индивидуального подхода к выбору комплекса применяемых методов, а также используемых методик проведения измерений и интерпретации получаемых материалов.

Особенно большие трудности при изучении коллекторов сложного строения вызывает образование в них во многих случаях глубоких зон проникновения промывочной жидкости, что зачастую приводит к невозможности определения характера насыщающего их флюида традиционными методами ГИС. Использование при бурении недостаточно качественных промывочных жидкостей с высокой водоотдачей способствует возникновению глубоких зон проникновения, которые нередко образуются даже в высокочемких коллекторах с межзерновой пористостью. При прочих равных условиях глубина зон проникновения тем больше, чем больше глубина залегания коллектора.

Поскольку из сложных коллекторов карбонатные обладают наибольшим спектром характерных особенностей и широко распространены, приведем краткие сведения о современном состоянии их изучения методами ГИС. В связи с тем, что в настоящее время имеется

много работ, посвященных методам изучения коллекторов сложного строения [1, 8, 12, 25, 28 и др.], ограничимся главным образом вопросами выделения коллекторов в разрезе и качественного определения характера насыщающего их флюида.

За последние два десятилетия выполнена большая работа по увеличению эффективности промыслово-геофизических исследований при изучении сложных, в частности карбонатных, коллекторов: практически повсеместно внедрены боковой (БМ) и индукционный (ИМ) методы, а в ряде районов акустический (АМ) и микробоковой (МБК), улучшено качество измерений методами радиометрии, внедряются гамма-гамма- и ядерно-магнитный методы, производится запись микрокаверномером в крупном масштабе, используется методика нормализации кривых ρ_K и нейтронного гамма-метода (НГМ) или АМ, проводятся временные замеры и измерения со сменой промывочной жидкости, широкое применение получили пластоиспытатели на бурильных трубах и опробователи пластов на каротажном кабеле, сверлящие керноотборники, газометрия и т.д. Благодаря этому к настоящему времени сложились определенные комплексы геофизических исследований, отличающиеся друг от друга в зависимости от используемых промывочных жидкостей, преимущественного развития тех или иных типов коллекторов, а также степени внедрения новых методов.

Наиболее простым типом карбонатных коллекторов являются чистые или слабоглинистые коллекторы с межзерновой пористостью, структура порового пространства которых аналогична структуре гранулярных терригенных коллекторов. Вследствие этого комплекс методов ГИС и диагностические признаки при их изучении практически не различаются. Так, в скважинах, бурящихся на пресной промывочной жидкости, для выделения в разрезе коллекторов и оценки их емкостных свойств обычно достаточно применения комплекса методов, включающего стандартную электрометрию с регистрацией кривых КС и ПС, боковое электрическое зондирование (БЭЗ), микрозондирование (МЗ), радиометрию (ГМ и НГМ), кавернометрию, боковой и индукционный методы. В скважинах, бурящихся на соленой промывочной жидкости, вследствие малой информативности стандартной электрометрии и индукционного метода, для выделения коллекторов в разрезе применяются главным образом боковой и микробоковой методы, а также кавернометрия и ГМ, а определение пористости базируется на использовании нейтронного и акустического методов. Следует лишь отметить, что эффективность применения бокового метода сильно снижается с увеличением диаметра зоны проникновения, особенно повышающего.

При определении характера насыщения карбонатных коллекторов гранулярного типа широкое применение получила методика комп-

лексной интерпретации кривых ИМ-НГМ в скважинах с пресной и кривых БМ-НГМ (или АМ) в скважинах с высокоминерализованной промывочной жидкостью, получившая наименование методики нормализации [21, 33]. Однако и ее использование из-за относительно малой глубинности исследования существующих методов электрометрии ограничено лишь случаем неглубокого проникновения промывочной жидкости.

Необходимо отметить, что при изучении уплотненных гранулярных коллекторов нередко возникают трудности как с выделением их в разрезе, так и с оценкой нефтегазонасыщения. Это связано, с одной стороны, с увеличением в них глубины проникновения промывочной жидкости, а с другой – со снижением информативности таких методов, как БЭЗ, ИМ, МЗ и НГМ [25]. В таких случаях при выделении коллекторов существенную помощь могут оказать гамма-гамма-плотностной, ядерно-магнитный и акустический методы, а при определении характера их насыщения – использование опробователей пластов на кабеле и пластоиспытателей на бурильных трубах, что, естественно, повышает общую стоимость геологоразведочных работ.

Каверновые и каверново-поровые коллекторы обычно выделяются в разрезе по тем же признакам, что и чисто поровые. При этом проникновение в них промывочной жидкости, как правило, неглубокое [1], вследствие чего определение характера насыщающего их флюида методами ГИС обычно не вызывает затруднений.

Более сложными, по сравнению с чисто поровыми, являются порово-трещинные коллекторы. Однако поскольку доля трещинной пористости в общей пористости породы у таких коллекторов, как правило, незначительна, многими геофизическими методами они практически не различаются [1]. И лишь акустический метод, на показаниях которого сильно сказывается трещиноватость пород, позволяет установить наличие порово-трещинного коллектора по повышенному затуханию упругих колебаний, да и то главным образом в случае преимущественно горизонтальной (или близкой к ней) ориентировке трещин, тогда как в реальных породах более распространенной является вертикальная трещиноватость [29]. В благоприятных случаях порово-трещинные коллекторы можно выделить по данным кавернометрии и коркометрии, БЭЗ (сложное многофазное проникновение на кривых зондирования), а также по расхождению в показаниях БМ при исследовании методом двух растворов и с помощью методики нормализации кривых комплекса методов ИМ-БМ-НГМ. Характерным для данного типа коллектора является повышенное значение коэффициента пористости, определяемого по методу сопротивления, по сравнению с пористостью, получаемой по данным НГМ [13].

Определению характера насыщения порово-трещинных коллек-

торов часто препятствует глубокое проникновение промывочной жидкости по трещинам, в результате чего даже самые большие из используемых в настоящее время зондов электрометрии не позволяют получить истинное удельное сопротивление неизменной части пласта. Поэтому в таких случаях разделение коллекторов на нефте- и водонасыщенные целесообразно проводить путем изучения процесса расформирования зоны проникновения в открытом стволе с помощью методов электрометрии (БМ, ИМ), а в обсаженных неперфорированных скважинах — с помощью нейтронных методов, а также прямыми методами — газометрией и испытателями пластов на трубах и кабеле [12].

Коллекторы трещинного и каверново-трещинного типов с плотной непроницаемой матрицей наиболее надежно выделяются в разрезе с помощью методики двух растворов. В случае преимущественно горизонтальной ориентировки трещин характерным для них является резкое ослабление амплитуды акустического сигнала. При обильной изометричной трещиноватости часто наблюдается увеличение диаметра скважины, вызванное обрушением ее стенок, а при большой раскрытости трещин и каверн и бурении на глинистом растворе нередко отмечается повышенная естественная γ -активность, обусловленная образованием зоны кольматации. Отличить друг от друга трещинные и каверново-трещинные коллекторы можно по соотношению величин коэффициентов пористости, определяемых методами электрометрии, НГМ и АМ. В первом случае коэффициент пористости, полученный по данным электрометрии, превышает величину пористости, определяемую по диаграммам НГМ и АМ, а во втором — коэффициент пористости по НГМ больше, чем по электрометрии и АМ, причем тем больше, чем больше доля каверновой пористости.

Эффективность оценки характера насыщения коллекторов трещинного и каверново-трещинного типов в значительной мере определяется степенью раскрытости трещин и их ориентировкой. При бурении на глинистом растворе и малой раскрытости трещин вследствие сильной глинизации их стенок до полного закупоривания уже вскоре после вскрытия коллектора возможно прекращение фильтрации промывочной жидкости в пласт. Поэтому образующаяся в таких случаях зона проникновения имеет, как правило, относительно небольшой диаметр. С увеличением раскрытости трещин свыше 250–300 мкм полной закупорки их обычно не происходит и фильтрация в пласт продолжается длительное время, но с разной скоростью. В начальный период, исчисляемый первыми десятками или даже единицами минут после вскрытия пласта, происходит быстрое проникновение промывочной жидкости на большую глубину, которое в последующем сменяется медленной фильтрацией небольших ее объемов в течение продолжительного (до нескольких суток и более) времени [9].

Поэтому можно считать, что образование глубоких зон проникновения в трещинных и каверново-трещинных коллекторах в основном происходит уже вскоре после вскрытия пласта, а в последующем ее диаметр увеличивается незначительно.

При использовании в качестве промывочной жидкости технической воды быстрое формирование глубоких зон проникновения происходит в коллекторах как с малой, так и с большой раскрытостью трещин. Причем в пластах с преимущественно горизонтальной ориентировкой трещин при прочих равных условиях образуются более глубокие зоны проникновения. Увеличение репрессии на пласт также приводит к росту диаметра зоны проникновения.

Отмеченные особенности проникновения промывочной жидкости в коллекторы трещинного и каверново-трещинного типов сильно ограничивают возможности использования методов ГИС для определения характера их насыщения. Это обусловлено недостаточной глубиной существующих методов промысловой геофизики, вследствие чего определение свойств пласта за зоной проникновения практически невозможно. Поэтому все методики, основанные на сравнении характеристик нефте- и водонасыщенной частей пласта или сопоставлении показаний разноглубинных установок, в данном случае неприменимы. Из-за высокой скорости образования зоны проникновения малоэффективным является также прослеживание изменения ее параметров в процессе формирования.

Наиболее надежным способом решения указанной задачи является использование методики, основанной на изучении процесса расформирования зоны проникновения в открытом стволе с помощью методов электрометрии, а в обсаженной неперфорированной скважине — импульсных нейтронных методов радиометрии. Однако в первом случае это требует создания значительной депрессии на пласт, что сильно усложняет технологию исследований, а во втором — длительного времени между повторными замерами, что лишает методы ГИС одного из основных преимуществ — оперативности.

Наиболее сложными с точки зрения строения порового пространства и изучения их геофизическими методами являются порово-каверново-трещинные коллекторы. Такие коллекторы, обладающие первичной поровой емкостью, разбиты на блоки трещинами, с которыми связаны каверны выщелачивания. Вследствие такого строения порового пространства процесс проникновения в них промывочной жидкости существенно усложняется по сравнению с другими типами коллекторов. Вначале, сразу же после вскрытия коллектора, происходит быстрое и глубокое проникновение жидкости по трещинам и кавернам. Если в качестве промывочной жидкости используется глинистый раствор, то по мере фильтрации промывочной жидкости в прискважин-

ной части пласта образуется зона кольматации, приводящая к снижению и стабилизации скорости фильтрации [9].

Характер взаимодействия пластовой воды, заполняющей поровое пространство блоков породы, с проникшей по трещинам и кавернам промывочной жидкостью различается в зависимости от их расположения по отношению к стволу скважины. Вблизи ствола скважины естественный пластовый флюид, находящийся в поровом пространстве блоков, будет как бы „запечатан” быстро проникшей по трещинам и кавернам промывочной жидкостью. „Запечатыванию” пластового флюида в блоках коллектора способствует также образование зоны кольматации. Очевидно, что в этом случае характер взаимодействия между флюидом, заполняющим поровое пространство блоков, и окружающей их со всех сторон промывочной жидкостью будет определяться главным образом процессами диффузии, что при использовании пресных промывочных жидкостей приводит к опреснению матрицы пласта-коллектора.

По мере удаления от ствола скважины характер взаимодействия между флюидом матрицы и промывочной жидкостью изменяется: хотя в зоне продолжающегося медленного вытеснения заполняющего трещины и каверны пластового флюида промывочной жидкостью также будет происходить опреснение матрицы породы, но теперь в основном за счет процесса фильтрации жидкости из трещин и каверн в поровое пространство блоков.

Наиболее надежным способом выделения коллекторов порово-каверново-трещинного типа в разрезе является, как и в предыдущем случае, применение методики двух растворов, а также гидродинамические исследования в процессе бурения [18]. Определению типа коллектора может способствовать отмеченный выше эффект опреснения пластовой воды, заполняющей матрицу породы, с помощью которого можно установить наличие в коллекторе первичной пористости блоков породы. С этой целью необходимо проводить временные замеры малоглубинным методом электрометрии (например, боковым или лучше псевдобоковым), причем первый из них должен быть сделан вскоре после вскрытия коллектора. Увеличение регистрируемого кажущегося сопротивления во времени свидетельствует о наличии блоковой пористости. При этом следует иметь в виду, что в случае низкой пористости матрицы породы временные вариации регистрируемого сопротивления могут быть небольшими, что предъявляет высокие требования к точности их измерения [25].

Оценка характера насыщения коллекторов порово-каверново-трещинного типа, как и других коллекторов с наличием трещинной пористости, представляет большие трудности прежде всего из-за быстрого образования в них глубоких зон проникновения промывоч-

ной жидкости, не позволяющих получать истинные параметры пласта за зоной проникновения даже самыми глубинными методами электрометрии. Поэтому для решения указанной задачи наиболее целесообразно использование методик, основанных на изучении процесса расформирования зоны проникновения, что приводит либо к усложнению технологии исследований, либо к потере их оперативности.

Таким образом, даже беглый анализ возможностей исследования карбонатных коллекторов с разными типами пористости методами ГИС показывает, что наибольшие затруднения вызывает изучение коллекторов, поровое пространство которых полностью или частично определяется трещиноватостью породы. И связано это главным образом с быстрым проникновением промывочной жидкости или ее фильтрата в пласты-коллекторы на расстояния, превышающие глубинность исследования существующих методов ГИС, что сильно усложняет или даже вовсе исключает возможность определения характера насыщения таких коллекторов.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что наряду с трещиноватыми коллекторами глубокие зоны проникновения могут возникать в малопористых гранулярных коллекторах при использовании в процессе бурения промывочных жидкостей с высокой водоотдачей, больших репрессиях на пласт, а также при глубине скважин свыше 3000 м.

Изложенное ставит перед промысловой геофизикой актуальнейшую задачу такого увеличения глубинности исследования методов ГИС, чтобы можно было получать параметры неизменной части пластов-коллекторов даже при наличии глубоких зон проникновения промывочной жидкости, характерных для трещинных коллекторов. Поскольку известно [25], что только установки электрометрии могут иметь значительно различающиеся радиусы исследования, очевидно, что в первую очередь это относится именно к ним.

§ 2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК НЕКОТОРЫХ ЗОНДОВ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

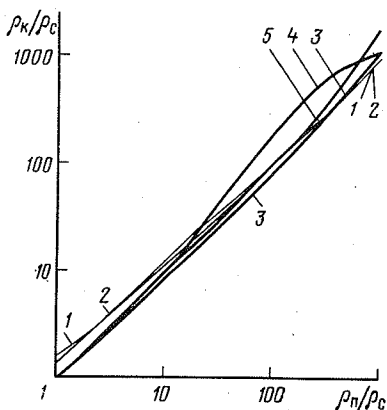
Вопросам увеличения глубинности зондов электрометрии уделяется большое внимание, так как радиус исследования современных зондов, в том числе фокусированных, пока недостаточен для изучения коллекторов с глубоким проникновением промывочной жидкости.

Рассмотрим возможности и ограничения применения некоторых наиболее глубинных на сегодняшний день зондов электрометрии. К ним относятся зонды индукционного метода 6Ф1 и 6Ф1м [37], зонд бокового метода БК₆ [42], зонд электромагнитного метода ЭКМЗ [22], а также градиент-зонды длиной $AO \geq 4$ м.

Как известно, свойства того или иного зонда электрометрии

Рис. 1. Разрешающая способность по сопротивлению некоторых зондов электрометрии.

Зонды ИМ: 1 — 6Ф1, 2 — 6Ф1М; 3 — зонд БК₆;
градиент-зонды: 4 — $L/d_c = 20$, 5 — $L/d_c = 125$



определяются его характеристиками, основными из которых являются следующие.

1. Разрешающая способность по сопротивлению — зависимость кажущегося сопротивления пласта неограниченной мощности без проникновения от его удельного сопротивления — $\rho_k/\rho_c = f(\rho_p/\rho_c)$.

2. Вертикальная характеристика, представляющая собой зависимость $\rho_{kh}/\rho_{k\infty} = f(h/d_c)$, где ρ_{kh} — кажущееся сопротивление пласта ограниченной мощности h ; $\rho_{k\infty}$ — кажущееся сопротивление пласта неограниченной мощности с тем же удельным электрическим сопротивлением; d_c — диаметр скважины. Она отражает влияние вмещающей среды на показания зонда против пластов ограниченной мощности.

3. Радиальная характеристика, представляющая собой зависимость $\rho_{k,3сл}/\rho_{k,2сл} = f(D/d_c)$, где $\rho_{k,3сл}$ — кажущееся сопротивление пласта при имеющейся в наличии зоне проникновения, а $\rho_{k,2сл}$ — кажущееся сопротивление того же пласта без проникновения. Она характеризует собой глубину исследования зонда при наличии в пласте зоны проникновения с удельным сопротивлением $\rho_{зп}$ и диаметром D .

На рис. 1 приведено сопоставление кривых разрешающей способности по сопротивлению. Кривые $\rho_k/\rho_c = f(\rho_p/\rho_c)$ для зонда БК₆ заимствованы из [24], для зондов индукционного метода 6Ф1 и 6Ф1М — из [37] и, наконец, для градиент-зондов с AO/d_c , равными 20 и 125, — построены с помощью палеток БЭЗ.

Как видно из рис. 1, зонд БК₆ по этой характеристике наиболее хороший. Зависимость между удельным сопротивлением ρ_p пласта неограниченной мощности без проникновения и регистрируемым им кажущимся сопротивлением ρ_k весьма близка к линейной в очень широком диапазоне ρ_p .

Для зондов индукционного метода 6Ф1 и 6Ф1М линейный характер зависимости между ρ_k и ρ_p наблюдается при повышенных сопротивле-

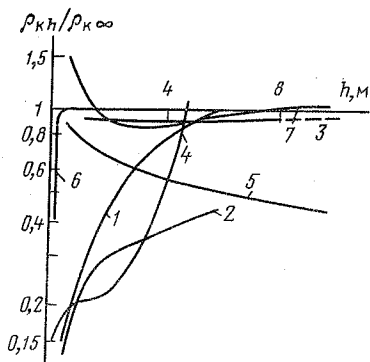


Рис. 2. Вертикальные характеристики некоторых зондов электрометрии ($\rho_{\Pi}/\rho_c = 100$, $\rho_{\text{ВМ}}/\rho_c = 10$, $d_c = 0,2$ м). Зонды ИМ: 1 - 6Ф1, 2 - 6Ф1м; 3 - зонд БК_б; градиент-зонды: 4 - $L/d_c = 20$, 5 - $L/d_c = 25$, 6 - $L = \infty$; 7 - зонд ЭМКЗ_б

ниях. При сопротивлениях пласта ниже 10 Ом·м линейность за счет влияния скин-эффекта нарушается и регистрируемые этими зондами кажущиеся сопротивления превышают удельные тем больше, чем меньше ρ_{Π} .

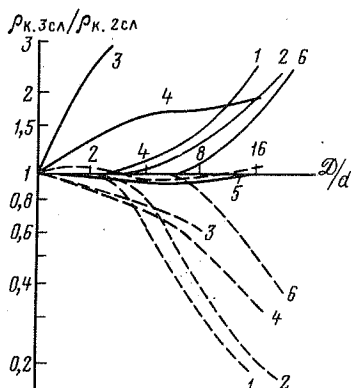
Для градиент-зондов больших размеров между кажущимся и удельным сопротивлениями в широком диапазоне изменения последнего наблюдается прямая пропорциональность. При этом с увеличением AO/d_c интервал линейной зависимости ρ_k от ρ_{Π} расширяется. Лишь при очень высоком удельном сопротивлении среды прямая пропорциональность между ρ_k и ρ_{Π} нарушается, причем ρ_k превышает ρ_{Π} .

Перейдем к рассмотрению вертикальных характеристик зондов электрометрии с большой глубиной исследования, представленных на рис. 2. Кривые для зонда бокового метода взяты из [42], для зондов индукционного метода рассчитаны с помощью вертикального геометрического фактора [37], для градиент-зонда с $AO=25$ м ($125 d_c$) кривая построена с помощью палетки ТП-2, для градиент-зонда с $AO = 4$ м ($20 d$) - с помощью палеток ЭКЗ и для градиент-зонда бесконечно большого размера рассчитана по методике, изложенной в [17].

Наилучшей вертикальной характеристикой обладает градиент-зонд бесконечно большого размера (см. рис. 2), на показаниях которого мощности пластов, превышающие $2 d_c$, практически не сказываются. Далее следуют зонды БК_б и ЭМКЗ, показания которых при изменении мощности пласта свыше 1-2 м изменяются мало. Зонды индукционного метода (особенно 6Ф1м) испытывают довольно сильное влияние мощности пласта. При этом значения ρ_k занижены по сравнению с ρ_{Π} тем больше, чем меньше мощность пласта. Самой плохой вертикальной характеристикой обладает градиент-зонд с $AO = 20 d$, зависимость показаний которого от мощности пласта непостоянна по величине и знаку, а ρ_k могут отличаться от ρ_{Π} в несколько раз, что затрудняет введение поправок.

Рис. 3. Радиальные характеристики некоторых зондов электрметрии для пласта неограниченной мощности.

Зонды ИМ ($\rho_c = 1$ Ом·м; $d_c = 0,2$ м; при повышающем проникновении $\rho_{\Pi} = 5 \rho_c$, $\rho_{зп} = 40 \rho_c$; при понижающем проникновении $\rho_{\Pi} = 40 \rho_c$, $\rho_{зп} = 5 \rho_c$): 1 — 6Ф1, 2 — 6Ф1м; 3 — зонд БК_б (при повышающем проникновении $\rho_{\Pi} = 100 \rho_c$, $\rho_{зп} = 1000 \rho_c$; при понижающем проникновении $\rho_{\Pi} = 1000 \rho_c$, $\rho_{зп} = 100 \rho_c$); градиент-зонды: 4 — $L/d_c = 20$, 5 — $L/d_c = 125$ (при повышающем проникновении $\rho_{\Pi} = 100 \rho_c$, $\rho_{зп} = 200 \rho_c$; при понижающем проникновении $\rho_{\Pi} = 1000 \rho_c$, $\rho_{зп} = 100 \rho_c$); 6 — зонд ЭМКЗ_б ($d_c = 0,2$ м; при повышающем проникновении $\rho_{\Pi} = 3,6$ Ом·м, $\rho_{зп} = 30$ Ом·м; при понижающем проникновении $\rho_{\Pi} = 30$ Ом·м, $\rho_{зп} = 3,6$ Ом·м)



Влияние мощности пластов на показания градиент-зондов больших, но конечных размеров (на рис. 2 зонд с $AO=125 d_c$), сказывается в занижении ρ_k по сравнению с ρ_{Π} . Однако простая форма вертикальной характеристики позволяет ввести в измеряемое значение ρ_k поправки за влияние ограниченной мощности пласта. Чем больше размер зонда по сравнению с мощностью пласта, тем ближе ρ_k к ρ_{Π} . При мощности, соизмеримой с длиной зонда, вертикальная характеристика градиент-зондов резко ухудшается.

Глубинность исследования рассматриваемых зондов электрметрии иллюстрируется радиальными характеристиками для пластов неограниченной мощности (рис. 3), при построении которых использовались различные источники, поэтому параметры разреза, для которых приведены отдельные кривые, не всегда совпадают друг с другом. На рисунке сплошной линией обозначены радиальные характеристики для повышающего, а пунктиром — для понижающего проникновения.

Из анализа кривых рис. 3 следует, что при повышающем проникновении наименьшей глубиной исследования обладает зонд бокового метода. Влияние зоны проникновения на его показания начинает резко сказываться с минимальных диаметров. В результате этого радиальная характеристика отходит от оси абсцисс непосредственно из начала координат. Если за критерий глубинности зондов принять отличие $\rho_{к.Зсл}$ регистрируемого при наличии зоны проникновения, от $\rho_{к.Зсл}$ того же пласта без проникновения в два раза, то глубинность исследования зонда бокового метода при принятом соотношении ρ_{Π} и $\rho_{зп}$ будет составлять $1,8 d_c$ (табл. 1). При понижающем проникновении глубинность исследования зонда БК_б довольно значительна и составляет примерно $12 d_c$. Зонды индукционного метода, наоборот, харак-

Таблица 1

Глубинность исследования некоторых зондов электрометрии
в пластах бесконечно большой мощности

Зонды	D/d_c при проникновении	
	понижающем	повышающем
БК _б	~ 12	1,8
6Ф1	5	13,5
6Ф1м	6,3	18
ЭМКЗ	16	21,5
Градиент-зонды:		
$AO/d_c = 20$	9,5	24
$AO/d_c = 125$	> 32	> 32

теризуются большей глубиной исследования при повышающем и сравнительно низкой – при понижающем проникновении (см. рис. 3 и табл. 1).

Такие особенности радиальных характеристик зондов бокового и индукционного методов ограничивают их применение при исследовании соответственно водонасыщенных пластов с повышающим проникновением и нефтенасыщенных коллекторов с глубоким понижающим проникновением промывочной жидкости.

Зонд ЭМКЗ характеризуется наибольшей глубиной исследования по сравнению с рассмотренными зондами электрометрии, причем разница в случае повышающего и понижающего проникновения промывочной жидкости относительно невелика, что является положительным свойством этого зонда. Правда, радиальные характеристики зонда ЭМКЗ получены по данным моделирования без учета влияния скважины, в связи с чем глубинность исследования его, по-видимому, несколько завышена.

Глубинность исследования градиент-зонда с $AO/d_c = 20$ при понижающем проникновении приближается к глубинности исследования зонда БК_б, а при повышающем – несколько превышает глубинность зонда ЭМКЗ.

Наибольшей глубиной из всех рассматриваемых зондов электрометрии и при понижающем и при повышающем проникновении характеризуется градиент-зонд большого размера ($AO/d_c = 125$). Радиальные характеристики его на рис. 3 вплоть до $D/d_c = 16$ идут, практически сливаясь с осью абсцисс, что свидетельствует об отсутствии заметного влияния зоны проникновения на результаты измерений этим зондом и о значительно большей глубинности исследования его по сравнению с другими зондами электрометрии.

Таблица 2

D/d_c	$\rho_{к.3сп}/\rho_{к.2сп}$	
	$\rho_{\Pi} = 20 \rho_c; \rho_{3\Pi} = 200 \rho_c$	$\rho_{\Pi} = 40 \rho_c; \rho_{3\Pi} = 5 \rho_c$
1	1	1
2	0,96	1
4	0,925	1
8	0,9	1,075
16	0,91	1,3

Приведем дополнительные данные о глубинности градиент-зонда с $AO/d_c = 125$ при значениях удельных сопротивлений пласта и зоны проникновения, отличающихся от приведенных на рис. 3 (табл. 2).

Сопоставляя эти данные с радиальными характеристиками зондов на рис. 3, можно сделать вывод о том, что глубинность исследования градиент-зондов больших размеров уменьшается с увеличением отношения $\rho_{\Pi}/\rho_{3\Pi}$ и с уменьшением отношений ρ_{Π}/ρ_c и $\rho_{3\Pi}/\rho_c$.

Проведенный анализ радиальных характеристик разных зондов электротметрии свидетельствует о том, что наибольшей глубинности исследования можно добиться, применяя градиент-зонды с максимально возможными по техническим соображениям размерами.

Важным показателем любого метода промысловой геофизики является его способность расчленять разрез, т.е. выделять в нем пласты, отличающиеся от вмещающих отложений по тому параметру, который используется при измерениях данным методом. Для характеристики этого свойства зондов электротметрии целесообразно использовать зависимости типа $\rho_k/\rho_{вм} = f(h/d_c)$, названные дифференцирующей способностью. Они показывают, насколько отчетливо выделяется пласт на фоне вмещающих его пород.

На рис. 4 приведены характеристики дифференцирующей способности некоторых зондов для одиночного пласта с удельным сопротивлением, в 10 раз превышающим сопротивление вмещающих пород. Для зондов индукционного метода 6Ф1 и 6Ф1м они рассчитаны с помощью кривых вертикального геометрического фактора [37], для зонда бокового метода БК₆ — построены с использованием приведенных в [42] вертикальных характеристик, для градиент-зондов конечного размера — построены с помощью палеток ЭКЗ, для зонда ЭМКЗ кривая построена с помощью вертикальной характеристики, приведенной на рис. 2, для градиент-зонда с $AO = \infty$ — рассчитана по методике, изложенной в [17], и получена экспериментально на электроинтеграторе ЭКСМ.

Анализ кривых рис. 4 показывает, что наилучшей дифференцирующей способностью обладает зонд БК₆. Хотя его показания при любой

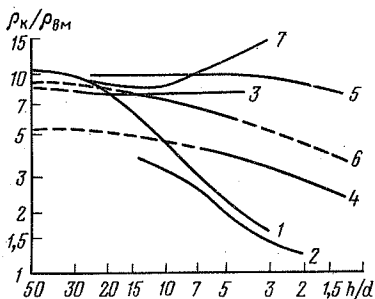


Рис. 4. Характеристики дифференцирующей способности некоторых зондов электрометрии для одиночного пласта высокого сопротивления ($\rho_{\Pi}/\rho_c = 100$, $\rho_{вм}/\rho_c = 10$, $d_c = 0,2$ м).

Зонды ИМ: 1 — 6Ф1; 2 — 6Ф1м; 3 — зонд БК₆; градиент-зонды: 4 — $L/h = 6$, 5 — $L = \infty$ (расчетная кривая), 6 — $L = \infty$ (по данным ЭКСМ); 7 — зонд ЭМКЗ₆

мощности пласта меньше истинного удельного сопротивления, они практически не меняются при изменении мощности пласта до $h \leq 4 d_c$. При этом ρ_k пласта примерно в 8 раз превышает удельное сопротивление вмещающих пород.

Дифференцирующая способность зонда ЭМКЗ также достаточно высока, хотя способность его к более рельефному выделению пластов ($h \leq 2$ м) не имеет пока физического обоснования.

Зонды индукционного метода 6Ф1 и 6Ф1м выделяют в разрезе одиночные маломощные пласты хуже всего. Если принять, что для уверенного выделения пласта в разрезе достаточно отличие аномалии ρ_k против него по сравнению с уровнем вмещающих пород в два раза, то зонды индукционного метода позволяют выделять пласты лишь с мощностью, превышающей (4–5) d_c (0,8–1 м).

Дифференцирующая способность градиент-зондов бесконечно большого размера по данным измерений на электроинтеграторе ЭКСМ достаточно высокая; пласты мощностью 2,5 d_c (0,5 м) характеризуются аномалиями, в 5 раз превышающими уровень вмещающих пород, что более чем достаточно для их уверенного выделения в разрезе. При увеличении мощности пласта рельефность выделения его на фоне вмещающих пород закономерно возрастает. Следует отметить, что по результатам расчетов дифференцирующая способность градиент-зондов бесконечно большого размера существенно выше, чем по данным электроинтегратора ЭКСМ, что связано с приближенным характером использованных формул.

Дифференцирующая способность градиент-зондов большого, но конечного размера уменьшается по сравнению с зондом бесконечно большого размера тем больше, чем меньше отношение AO/h . Так, при $AO/h = 6$ пласты мощностью 2,5 d_c (0,5 м) выделяются на фоне вмещающих пород аномалиями, в 3 раза превышающими ρ_{Π} последних.

Хотя градиент-зонды большого размера обладают и худшей дифференцирующей способностью, чем, скажем, зонд БК₆, ее вполне достаточно для уверенного выделения в разрезе пластов мощностью

0,5 м и выше. Повысить дифференцирующую способность градиент-зондов можно увеличением их размеров.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. В диапазоне изменения сопротивлений, наиболее часто встречающихся при электрометрии скважин, между удельным сопротивлением однородной среды и кажущимся сопротивлением, регистрируемым градиент-зондами большого размера, сохраняется прямо пропорциональная зависимость. С увеличением размера градиент-зонда диапазон линейной зависимости между удельным и кажущимся сопротивлениями увеличивается.

2. Влияние ограниченной мощности пласта сказывается в занижении ρ_k , регистрируемого градиент-зондами больших размеров, по сравнению с истинным удельным сопротивлением пласта. Увеличение размера зонда по сравнению с мощностью пласта приводит к закономерному уменьшению разницы между регистрируемыми ρ_k и ρ_n .

3. Глубинность исследования градиент-зондов больших размеров при исследовании пластов бесконечно большой мощности наибольшая из всех существующих в настоящее время методов электрометрии. Увеличение размера зонда приводит к увеличению глубинности исследования.

4. Дифференцирующая способность градиент-зондов больших размеров достаточно высока и позволяет уверенно выделять в разрезе пласты мощностью 0,5 м и выше. С увеличением размера зонда по сравнению с мощностью пластов четкость выделения их возрастает.

Таким образом, несмотря на то, что некоторые характеристики (например, вертикальная) градиент-зондов больших размеров хуже, чем у других зондов электрометрии, совокупность свойств и главное — наибольшая из всех известных методов электрометрии глубинность исследования позволяют считать их весьма перспективными при изучении пластов-коллекторов, в которых наблюдаются глубокие зоны проникновения промывочной жидкости. При этом для достижения наибольшего эффекта длину градиент-зондов целесообразно увеличивать до максимально возможных по техническим соображениям размеров.

§ 3. УСЛОВИЯ СОЗДАНИЯ КВАЗИОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ УСТАНОВКАМИ С КОНЕЧНЫМИ РАЗНОСАМИ ПИТАЮЩИХ ЭЛЕКТРОДОВ

Улучшение характеристик градиент-зондов с увеличением их размера объясняется тем, что создаваемое электрическое поле при этом все более стремится к „нормальному”, токовые линии которого параллельны стволу скважины и перпендикулярны к плоскостям напластования. Такое или близкое к нему поле может быть создано

путем удаления питающего электрода зонда на достаточно большое расстояние от точки измерения.

При отсутствии скважины и зоны проникновения „нормальное” электрическое поле одновременно является и однородным, так как во всех пластах, расположенных вблизи точки записи зонда, плотность электрического поля j остается практически неизменной независимо от степени дифференциации пластов по удельному электрическому сопротивлению.

Для оценки размеров градиент-зонда, обеспечивающего конфигурацию поля в области измерений, близкую к однородному, воспользуемся широко известной палеткой ТП-2. Поскольку кривые $\rho_{к\max}/\rho_{вм} = f(AO/h)$ этой палетки рассчитаны для одиночных пластов ограниченной мощности без учета влияния скважины, а правая асимптота соответствует удельному электрическому сопротивлению, очевидно, что точка выхода их на асимптоту и будет соответствовать размеру зонда, создающего однородное поле в заданном геоэлектрическом разрезе.

Из рассмотрения палетки ТП-2 следует, что с увеличением удельного сопротивления пласта по сравнению с сопротивлением вмещающих пород размер градиент-зонда, при котором образуется однородное электрическое поле в районе исследуемого пласта, все более возрастает по сравнению с пластовой мощностью, достигая весьма значительных величин. Так, если $\rho_{п}/\rho_{вм} = 2,5$, то AO/h , при котором кривая зондирования еще на 10 % не доходит до асимптоты, составляет 6, а при $\rho_{п}/\rho_{вм} = 10$ — уже 65. Это значит, что при мощности пласта, например, 2 м для измерения его удельного сопротивления с точностью 10 % необходимо в первом случае использовать зонд с $AO=12$ м, а во втором — с $AO=130$ м.

Очевидно, что в реальных условиях скважины использование установок с такими разносами сопряжено с непреодолимыми в настоящее время техническими трудностями. Поэтому размеры зондов приходится ограничивать. Для сохранения в то же время в окрестностях точки измерения зонда поля, близкого к однородному, целесообразно использовать не точечный источник, а питающий диполь с достаточно большими разносами AB . В связи с этим представляет интерес анализ конфигурации электрического поля диполя в изотропной и особенно в анизотропной среде, которой в первом приближении может быть аппроксимирован слоистый разрез.

Уравнение токовых линий электрического диполя в однородной анизотропной среде может быть получено следующим образом.

Опишем из центров электродов A и B два шаровых сектора произвольных радиусов R_1 и R_2 так, чтобы сферические поверхности пересеклись, как показано на рис. 5. Ток, проходящий от электрода A через основание шарового сегмента m , будет равен

Рис. 5. Схема, поясняющая вывод уравнения линий тока электрического диполя в однородной анизотропной среде

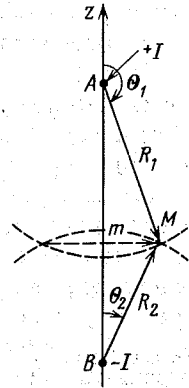
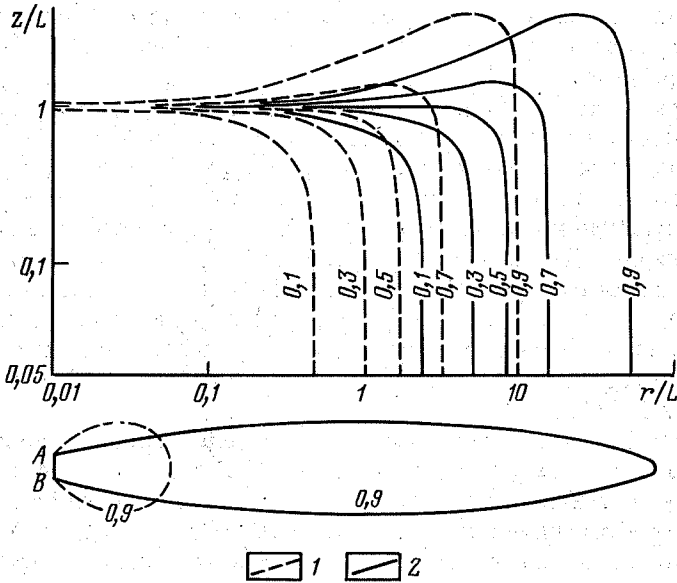


Рис. 6. Линии тока диполя:
1 - $\lambda = 1$; 2 - $\lambda = 5$. Шифр кривых - $(i_A + i_B) / I$



$$i_A = \int_S j dS. \quad (1)$$

Так как согласно работе [15] плотность тока одиночного электрода в однородной анизотропной среде

$$j = \frac{I \lambda}{4 \pi R^2 [1 + (\lambda^2 - 1) \cos^2 \theta]^{3/2}}, \quad (2)$$

то равенство (1) можно записать как

$$i_A = \int_S j dS = - \int_0^{2\pi} \int_{\theta_1}^{\pi} \frac{I \lambda}{4 \pi R_1^2 [1 + (\lambda^2 - 1) \cos^2 \theta]} R_1^2 \sin \theta d\psi d\theta, \quad (3)$$

где θ_1 — угол между образующей шарового сектора и прямой, соединяющей электроды A и B ; ψ — азимутальный угол; λ — коэффициент анизотропии.

В результате интегрирования уравнения (3)

$$i_A = \frac{I \lambda}{2} \left[\frac{\sqrt{1 + (\lambda^2 - 1) \cos^2 \theta_1} - \lambda \cos \theta_1}{\sqrt{1 + (\lambda^2 - 1) (\lambda^2 \cos^2 \theta_1 + 1)}} \right]. \quad (4)$$

Аналогично ток от электрода B в сечении „ m ”

$$i_B = \frac{I \lambda}{2} \left[\frac{\sqrt{1 + (\lambda^2 - 1) \cos^2 \theta_2} - \lambda \cos \theta_2}{\sqrt{1 + (\lambda^2 - 1) (\lambda^2 \cos^2 \theta_2 + 1)}} \right]. \quad (5)$$

Условием, определяющим токовую линию, является постоянство суммы токов $i_A + i_B$, протекающих через сечение m . На основании этого можно записать:

$$i_A + i_B = \frac{I \lambda}{2} \left[\frac{\sqrt{1 + (\lambda^2 - 1) \cos^2 \theta_1} - \lambda \cos \theta_1}{\sqrt{1 + (\lambda^2 - 1) (\lambda^2 \cos^2 \theta_1 + 1)}} + \frac{\sqrt{1 + (\lambda^2 - 1) \cos^2 \theta_2} - \lambda \cos \theta_2}{\sqrt{1 + (\lambda^2 - 1) (\lambda^2 \cos^2 \theta_2 + 1)}} \right]. \quad (6)$$

Решая равенство (6) относительно $\cos \theta_2$, получим уравнение токовой линии диполя в однородной анизотропной среде

$$\lambda^2 \cos^2 \theta_2 - b^2 \cos^2 \theta_2 (\lambda^2 - 1) - b^2 = 0, \quad (7)$$

где

$$b = 2 - 2 \frac{i_A + i_B}{I} - \frac{\lambda \cos \theta_1}{\sqrt{1 + \cos^2 \theta_1 (\lambda^2 - 1)}}.$$

При $\lambda = 1$ уравнение (7) преобразуется в равенство

$$i_A + i_B = I [1 - (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)/2],$$

выведенное В.Н. Дахновым для электрического диполя в однородном изотропном полупространстве.

На рис. 6 показаны токовые линии диполя в однородных изотропной ($\lambda = 1$) и анизотропной ($\lambda = 5$) средах, рассчитанные с помощью

уравнения (7) для плоскости, проходящей через токовые электроды. Шифром кривых является доля полного тока электродов A и B , протекающего в пределах данной токовой линии, — $(i_A + i_B)/I$. Так как электрическое поле диполя обладает двойной симметрией (относительно линии, соединяющей электроды A и B , а также плоскости, проходящей перпендикулярно к этой линии через середину диполя), то токовые линии нанесены только для первого квадранта. При построении использовался билогарифмический масштаб, что привело к несколько необычному виду токового поля. Поэтому в нижней части рис. 6 помещено схематичное изображение токовых линий с шифром 0,9 для изотропной и анизотропной сред в обычном линейном масштабе.

В микроанизотропной среде токовые линии диполя вытягиваются по радиусу от скважины тем больше, чем больше коэффициент анизотропии (см. рис. 6). Происходит своеобразная фокусировка тока за счет того, что продольная проводимость среды больше поперечной. В результате этого глубинность исследования в анизотропном разрезе увеличивается по сравнению с однородной изотропной средой. При этом характерно, что токовая линия, ограничивающая область, в которой заключено 90 % всего тока, эмиссируемого питающими электродами, при любом λ не выходит за пределы слоя (по оси z), равного $8L$. Это обстоятельство позволяет утверждать, что экранирующее влияние пластов, расположенных за пределами измерительной установки, не зависит от анизотропии разреза.

Согласно работе [5] в местах нарушения однородности среды под действием электрического поля возникают поверхностные заряды. Поскольку поверхностные электрические заряды на границах раздела сред с различными удельными сопротивлениями образуются за счет нормальной составляющей плотности тока j_n первичного электрического поля, задаваемого питающими электродами, важно оценить область пространства, в которой нормальная составляющая плотности тока отличается от ее значения в точке измерений не более, чем на 10 %. В последующем такую область будем называть областью квазиоднородного электрического поля. Хотя данное определение подразумевает отсутствие влияния скважины, его можно распространить и на случай наличия скважины, поскольку, как показано в [3], уменьшение плотности тока в породе за счет ее увеличения в скважине при размерах зонда 50–100 d_c невелико. Следовательно, величина нормальной составляющей плотности тока в окружающем скважину пространстве будет близка к ее значению при отсутствии скважины.

Рассмотрим трехэлектродный градиент-зонд.

Поместим начало сферической системы координат в центр питающего электрода A (рис. 7) и определим границы указанной области.

Полный вектор плотности тока электрода A в однородной анизот-

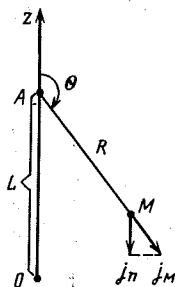


Рис. 7. Схема, поясняющая вывод уравнения (11)

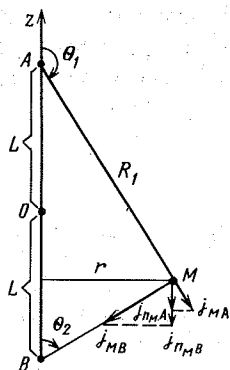


Рис. 8. Схема, поясняющая вывод уравнения (19)

ропной среде j_A определяется выражением (2), а его нормальная составляющая в любой точке пространства (согласно рис. 7)

$$j_{nM} A = j_A \cos(\pi - \theta) = -j_A \cos \theta = -\frac{I \lambda \cos \theta}{4 \pi R^2 [1 + (\lambda^2 - 1) \cos^2 \theta]^{3/2}}. \quad (8)$$

В точке измерений O , где $R=L$, а $\cos \theta = -1$,

$$j_{n0} A = I/4 \pi L^2 \lambda^2. \quad (9)$$

Так как по приведенному выше условию $1,1 j_{n0} A > j_{nM} A > > 0,9 j_{n0} A$, то

$$j_{nM} A = k j_{n0} A, \quad (10)$$

где $k = 0,9$ или $1,1$.

Подставляя в (10) вместо $j_{nM} A$ и $j_{n0} A$ их значения из (8) и (9), после преобразований получим

$$-\frac{\lambda \cos \theta}{R^2 [1 + (\lambda^2 - 1) \cos^2 \theta]^{3/2}} = \frac{k}{L^2 \lambda^2}. \quad (11)$$

Решая уравнение (11), находим

$$R = \pm \sqrt{-\frac{L^2 \lambda^3 \cos \theta}{k [1 + (\lambda^2 - 1) \cos^2 \theta]^{3/2}}}. \quad (12)$$

Минус под знаком радикала в выражении (12) означает, что искомая область располагается в третьем и четвертом квадрантах, где находится точка измерений, а $\cos \theta$ имеет отрицательный знак.

Для нахождения области 10 %-го отличия j_{nMAB} от j_{n_0AB} в случае четырехэлектродного градиент-зонда удобнее перейти к цилиндрической системе координат. С этой целью, используя рис. 8, произведем замену переменных:

$$R_1 = \sqrt{(L-z)^2 + r^2}, \quad R_2 = \sqrt{(L+z)^2 + r^2}, \quad (13)$$

$$\cos \theta_1 = -\frac{L-z}{\sqrt{(L-z)^2 + r^2}}, \quad \cos \theta_2 = \frac{L+z}{\sqrt{(L+z)^2 + r^2}}.$$

С учетом формул (13) выражение (8) для нормальной составляющей плотности тока, создаваемой электродом A в любой произвольной точке пространства M , может быть записано как

$$j_{nMA} = -j_A \cos \theta_1 = \frac{I \lambda (L-z)}{4 \pi [r^2 + \lambda^2 (L-z)^2]^{3/2}}. \quad (14)$$

Аналогично этому нормальная составляющая плотности тока, создаваемой в точке M электродом B ,

$$j_{nMB} = -\frac{I \lambda (L+z)}{4 \pi [r^2 + \lambda^2 (L+z)^2]^{3/2}}. \quad (15)$$

Суммарное значение нормальной составляющей плотности тока в точке M от электродов A и B

$$j_{nMAB} = j_{nMA} - j_{nMB} = \frac{I \lambda}{4 \pi} \left\{ \frac{L-z}{[r^2 + \lambda^2 (L-z)^2]^{3/2}} + \frac{L+z}{[r^2 + \lambda^2 (L+z)^2]^{3/2}} \right\}. \quad (16)$$

В точке измерений O , где $z = 0$ и $r = 0$, суммарное значение нормальной составляющей плотности тока

$$j_{n_0AB} = I/2 \pi L^2 \lambda^2. \quad (17)$$

По заданному условию $1,1 j_{n_0AB} > j_{nMAB} > 0,9 j_{n_0AB}$, поэтому

$$j_{nMAB} = k j_{n_0AB}, \quad (18)$$

где $k = 0,9$ или $1,1$.

Подставляя в (18) значения j_{nMAB} и j_{n_0AB} из (16) и (17), после преобразования получим

$$\left\{ \frac{L-z}{[r^2 + \lambda^2 (L-z)^2]^{3/2}} + \frac{L+z}{[r^2 + \lambda^2 (L+z)^2]^{3/2}} \right\} - \frac{zk}{\lambda^2 L^2} = 0. \quad (19)$$

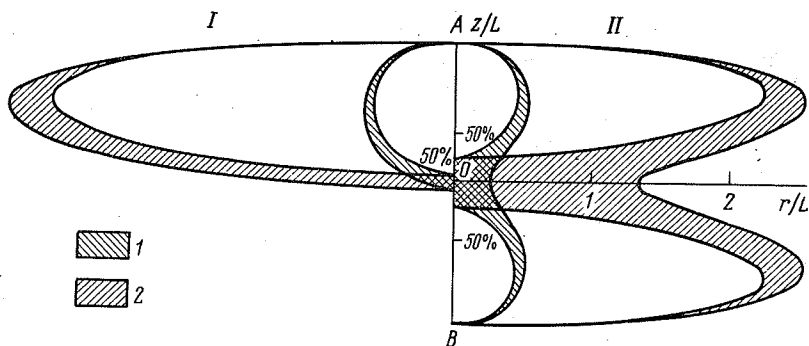


Рис. 9. Контуры областей с квазиоднородным электрическим полем, создаваемым одиночным электродом (I) и диполем (II) в однородных изотропной (1) и анизотропной (2) средах

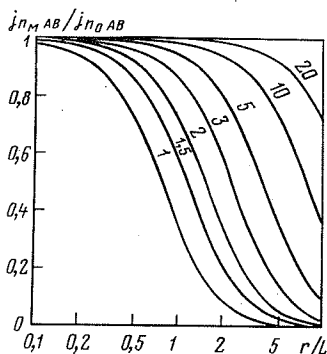
Уравнение (19) легко решается на ЭВМ методом итераций.

С помощью выражений (12) и (19) были вычислены координаты точек, ограничивающих области распространения квазиоднородного электрического поля, создаваемого трех- и четырехэлектродным градиент-зондами в однородных изотропной ($\lambda = 1$) и анизотропной ($\lambda = 5$) средах. Результаты вычислений представлены на рис. 9, в левой части которого нанесены контуры указанных областей для трех-, а в правой — для четырехэлектродного зондов. При рассмотрении этого рисунка прежде всего обращает на себя внимание тот факт, что с увеличением коэффициента анизотропии область квазиоднородного поля резко увеличивается в радиальном направлении пропорционально λ . В то же время в вертикальном направлении протяженность этой области при $\lambda > 1$ не зависит от коэффициента анизотропии, а определяется лишь размером зонда. При сравнении площадей областей квазиоднородного поля, создаваемых трех- и четырехэлектродными зондами, можно заметить, что во втором случае она больше, особенно в вертикальном направлении; для трехэлектродного зонда ширина области на оси скважины составляет $0,1 L$, а для четырехэлектродного — $0,36 L$.

Приведенное сравнение убедительно свидетельствует о преимуществах использования четырехэлектродных градиент-зондов перед трехэлектродными. Действительно, в квазиоднородном электрическом поле, простирающемся на достаточно большое расстояние от оси скважины, эквипотенциальные поверхности в удалении от границ пласта будут представлять собой плоскости, практически параллельные плоскостям напластования, и разность потенциалов, измеряемая в скважине на интервале MN , будет равна разности потенциалов на таком же интервале в пласте [3]. Следовательно, если исследуемый

Рис. 10. Кривые изменения нормальной составляющей плотности тока по радиусу от скважины в однородных изотропной и анизотропной средах.

Шифр кривых — λ



пласт попадает в пределы квазиоднородного электрического поля, то глубинность исследования его возрастает. Одновременно это способствует высокой степени дифференциации кривых, так как скачки кажущегося сопротивления на границах раздела сред будут соответствовать разнице в их удельных сопротивлениях.

Так как радиус области квазиоднородного поля увеличивается с увеличением анизотропии разреза, то, следовательно, наиболее благоприятным для исследования четырехэлектродными градиент-зондами является разрез, представленный частым чередованием пластов ограниченной мощности разного удельного сопротивления, т.е. такой, который для других методов ГИС является наиболее сложным. Зависимость ширины области квазиоднородного поля от размера четырехэлектродного зонда диктует необходимость увеличения длины последнего до максимально возможных по техническим соображениям величин.

Для оперативного определения радиуса области квазиоднородного поля, создаваемого четырехэлектродными градиент-зондами, на рис. 10 приведены кривые зависимости $j_{nM AB} / j_{n0 AB} = f(r/L)$, рассчитанные для линии, перпендикулярной к зонду в точке измерения. Расчет производился для разных значений λ по формуле

$$j_{nM AB} / j_{n0 AB} = \lambda^3 / [(\lambda r/L)^2 + \lambda^2]^{3/2}, \quad (20)$$

полученной при $z = 0$. С помощью этих кривых можно для разных λ определить радиус области любого приближения к однородному полю. Например, при $\lambda = 1$ граница области 10 %-го отличия $j_{nM AB}$ от $j_{n0 AB}$ находится от точки измерения на расстоянии r , равном $0,27 L$, а 20 %-го — на расстоянии r , равном $0,4 L$, и т.д.

Для нахождения ширины области 50 %-го приближения к однородному полю на рис. 9 по оси ординат вверх от точки измерения для

трех- и в обе стороны – для четырехэлектродных зондов штрихами нанесены дополнительные деления (в долях L).

Изложенное позволяет сделать следующие выводы.

1. Для создания в окружающей скважину среде квазиоднородного электрического поля наиболее целесообразно использовать установки (зонды) не с одним, а с двумя питающими электродами, разнесенными на возможно большее расстояние.

2. Анизотропия разреза способствует увеличению области распространения квазиоднородного поля по радиусу от скважины, что приводит к увеличению глубинности исследования по сравнению с однородной изотропной средой.

Глава II

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ СКВАЖИН В „НОРМАЛЬНОМ” ПОЛЕ

§ 1. АСИМПТОТИЧЕСКИЕ ЗНАЧЕНИЯ ρ_k И ПРЕДЕЛЬНЫЕ РАДИУСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАДИЕНТ-ЗОНДОВ

Поскольку при использовании четырехэлектродных градиент-зондов большого размера в районе точки записи образуется достаточно обширная область квазиоднородного поля, в ее пределах с точностью до $\pm 10\%$ должны соблюдаться все закономерности, свойственные „нормальному” электрическому полю. В связи с этим интересно рассмотреть особенности при измерениях в „нормальном” электрическом поле.

В результате длительного применения метода БЭЗ укоренилось мнение о том, что при неограниченном увеличении размера зонда, т.е. при приближении к „нормальному” электрическому полю, кажущееся сопротивление всегда асимптотически стремится к удельному и в пределе становится равным ему. Однако в действительности это является справедливым лишь в двух случаях [2, 6, 19]:

мощность пласта бесконечно велика, а диаметры скважины и зоны проникновения фильтра промывочной жидкости имеют конечную величину;

в пласте ограниченной мощности нет зоны проникновения, а диаметр скважины равен нулю.

Во всех остальных случаях, когда мощность пласта конечна, а диаметр скважины не равен нулю, сопротивление, к которому стремится ρ_k при неограниченном увеличении размера зонда, равно некоторому асимптотическому значению $\rho_{k,ас}$, отличающемуся от удельного сопротивления пласта, даже если в последнем отсутствует

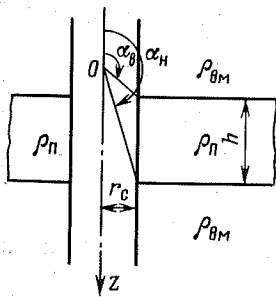


Рис. 11. Геоэлектрический разрез для пласта без проникновения промывочной жидкости

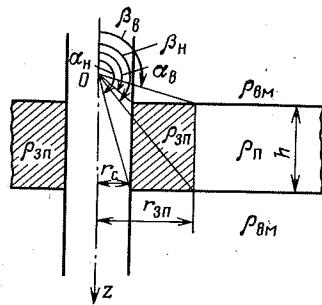


Рис. 12. Геоэлектрический разрез для пласта с проникновением промывочной жидкости

зона проникновения промывочной жидкости. Для доказательства этого утверждения воспользуемся методикой расчета кажущихся сопротивлений и приближенными формулами, приведенными в работе [17]. Поскольку эти формулы выведены для „нормального” электрического поля, то получаемые с их помощью кажущиеся сопротивления являются асимптотическими.

Наибольший интерес представляют формулы, выведенные для пластов ограниченной мощности с учетом влияния скважины без проникновения (рис. 11):

$$\rho_{к.ас} = \rho_{ВМ} + 0,5 (\rho_{П} - \rho_{ВМ}) (\cos \alpha_{В} - \cos \alpha_{Н}) \quad (21)$$

и при наличии зоны проникновения (рис. 12):

$$\rho_{к.ас} = \rho_{ВМ} + 0,5 k + (\rho_{ЗП} - \rho_{ВМ}) (\cos \alpha_{В} - \cos \beta_{В} - \cos \alpha_{Н} - \cos \beta_{Н}) + 0,5 (\rho_{П} - \rho_{ВМ}) (\cos \beta_{В} - \cos \beta_{Н}), \quad (22)$$

где коэффициент уплотнения тока в зоне проникновения

$$k = \frac{2 \rho_{ВМ} - b(\rho_{П} - \rho_{ВМ})}{2 \rho_{ВМ} - b(\rho_{ЗП} - \rho_{ВМ})},$$

$$\cos \alpha_{В} = \frac{(z/h) + 0,5}{\sqrt{[(z/h) + 0,5]^2 + (r_c/h)^2}}; \quad \cos \alpha_{Н} = \frac{(z/h) - 0,5}{\sqrt{[(z/h) - 0,5]^2 + (r_c/h)^2}};$$

$$\cos \beta_{В} = \frac{(z/h) + 0,5}{\sqrt{[(z/h) + 0,5]^2 + (r_{ЗП}/h)^2}}; \quad \cos \beta_{Н} = \frac{(z/h) - 0,5}{\sqrt{[(z/h) - 0,5]^2 + (r_{ЗП}/h)^2}};$$

$$b = - \frac{1}{\sqrt{1 + (r_{ЗП}/h)^2}};$$

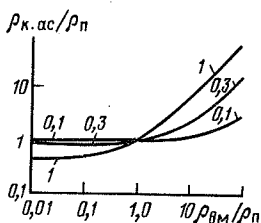


Рис. 13. Кривые зависимости $\rho_{к.ас}/\rho_{п} = f(\rho_{вм}/\rho_{п})$ для пластов без проникновения.
Шифр кривых — r_c/h

$\rho_{зп}$, $\rho_{п}$ и $\rho_{вм}$ — удельные электрические сопротивления соответственно зоны проникновения, неизмененного пласта и вмещающих пород; r_c и $r_{зп}$ — радиусы ствола скважины и зоны проникновения; h — мощность пласта; z — ордината точки наблюдения. При этом ось oz совпадает с осью скважины и направлена вниз, а начало цилиндрической системы координат соответствует середине исследуемого пласта.

Поскольку наиболее характерным значением кажущегося сопротивления, измеряемого в „нормальном” электрическом поле, является $\rho_{к}$, приуроченное к середине пласта, в дальнейшем изложении будет подразумеваться именно оно.

Если точка наблюдения расположена в центре пласта, где $z = 0$,

$$\cos \alpha_{в} = -\cos \alpha_{н} = \cos \alpha = \frac{0,5}{\sqrt{0,25 + (r_c/h)^2}}, \quad (23)$$

$$\cos \beta_{в} = -\cos \beta_{н} = \cos \beta = \frac{0,5}{\sqrt{0,25 + (r_{зп}/h)^2}}. \quad (24)$$

В этом случае формулы (21) и (22) принимают следующий вид:

$$\rho_{к.ас} = \rho_{вм} + (\rho_{п} - \rho_{вм}) \cos \alpha, \quad (25)$$

$$\rho_{к.ас} = \rho_{вм} + k(\rho_{зп} - \rho_{вм})(\cos \alpha - \cos \beta) + (\rho_{п} - \rho_{вм}) \cos \beta. \quad (26)$$

Из анализа формул (23) и (25) следует, что при $r_c/h = 0$ $\rho_{к.ас} = \rho_{п}$. Если же $r_c/h > 0$, то $\cos \alpha < 1$ и $\rho_{к.ас} \neq \rho_{п}$.

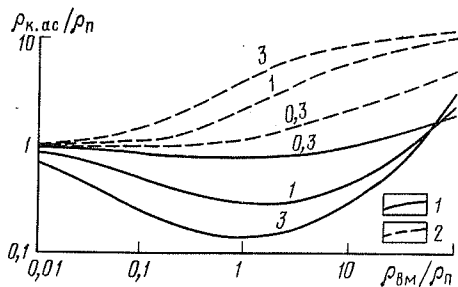
Из формулы (26) следует, что при $h = \infty$ и $D \neq \infty$ $\cos \alpha = \cos \beta = 1$ и $\rho_{к.ас} = \rho_{п}$. При $h \neq \infty$ $\cos \alpha$ и $\cos \beta < 1$ и $\rho_{к.ас} \neq \rho_{п}$ (см. рис. 12).

Таким образом, можно считать доказанным утверждение о том, что сопротивление, к которому асимптотически стремится $\rho_{к}$ при увеличении размера зонда до бесконечности, в общем случае не равно удельному сопротивлению пласта. Оно может быть приближенно вычислено с помощью формул (25) и (26).

На рис. 13 приведены кривые $\rho_{к.ас}/\rho_{п} = f(\rho_{вм}/\rho_{п})$ для постоянных значений r_c/h , рассчитанные по формулам (23) и (25). Из рисунка видно, что отношение $\rho_{к.ас}/\rho_{п}$ равно единице только при $\rho_{вм}/\rho_{п} = 1$. С физи-

Рис. 14. Кривые зависимости $\rho_{к.ас}/\rho_{п} = f(\rho_{вм}/\rho_{п})$ для пластов с проникновением:

1 — понижающим ($r_c/h = 0,1$; $\rho_{вп}/\rho_{п} = 0,1$); 2 — повышающим ($r_c/h = 0,1$; $\rho_{зп}/\rho_{п} = 10$). Шифр кривых — $r_{зп}/h$



ческой точки зрения это означает, что пласт полностью замещен вмещающими породами и, следовательно, превратился в однородную среду бесконечной мощности, для которой $\rho_{к.ас}$ действительно должно равняться $\rho_{п}$. Для $\rho_{вм}/\rho_{п} \neq 1$ значения $\rho_{к.ас}$ отличаются от $\rho_{п}$. При этом расхождения между $\rho_{к.ас}$ и $\rho_{п}$ в случае пластов низкого сопротивления ($\rho_{п} < \rho_{вм}$) становятся тем значительнее, чем больше r_c/h и чем резче различаются между собой $\rho_{вм}$ и $\rho_{п}$. В пластах высокого сопротивления ($\rho_{п} > \rho_{вм}$) влияние скважины (r_c/h) сказывается значительно меньше. Так, например, для пласта с параметрами $r_c/h = 0,1$ м, $\rho_{п} = 10 \rho_{вм}$ $\rho_{к.ас}/\rho_{п}$ будет равно 0,98, т.е. ошибка, вносимая скважиной, будет составлять 2%. Для такого же пласта с сопротивлением $\rho_{п} = 0,1 \rho_{вм}$ $\rho_{к.ас}/\rho_{п}$ равно 1,175, т.е. скважина вносит погрешность уже в 17,5%.

При наличии зоны проникновения кривые $\rho_{к.ас}/\rho_{п} = f(\rho_{вм}/\rho_{п})$ имеют более сложную форму, чем для непроницаемых пластов. На рис. 14 приведены подобные кривые, рассчитанные по формулам (23), (24) и (26) для постоянных значений r_c/h и $\rho_{зп}/\rho_{п}$.

В случае повышающего проникновения ($\rho_{зп}/\rho_{п} = 10$) при увеличении $\rho_{вм}/\rho_{п}$ от 0,01 до 100 отношение $\rho_{к.ас}/\rho_{п}$ непрерывно растет, а в случае понижающего проникновения ($\rho_{зп}/\rho_{п} = 0,1$) по мере увеличения $\rho_{вм}/\rho_{п}$ величина $\rho_{к.ас}/\rho_{п}$ сначала убывает, достигая минимума при $\rho_{вм}/\rho_{п} \approx 1$, а затем растет до значений, превышающих единицу. При увеличении радиуса зоны проникновения разница в значениях $\rho_{к.ас}$ и $\rho_{п}$ в общем случае также возрастает (см. рис. 14).

Таким образом, приведенные примеры наглядно иллюстрируют тот факт, что асимптотические значения кажущихся сопротивлений пластов ограниченной мощности отличаются от истинных удельных сопротивлений. К такому же выводу пришел Л.М. Альпин [2].

Поскольку формулы для вычисления $\rho_{к.ас}$ приближенные, представляет интерес оценка точности определения с их помощью асимптотических кажущихся сопротивлений. С этой целью в табл. 3 приведены $\rho_{к.ас}$, вычисленные с помощью выражения (25) и полученные путем моделирования на электроинтеграторе ЭКСМ. Из анализа таблицы

Сопоставление значений $\rho_{к.ас_1}$ (в Ом·м), вычисленных по формуле (25), и $\rho_{к.ас_2}$ (в Ом·м), полученных на электронтеристоре ЭКСМ

$\rho_{Д/Р_{ЭМ}}$	$\rho_{Д/Р_{С}}$	$\rho_{ЭМ/Р_{С}}$	h/d_c																	
			4				8				16									
			$\rho_{к.ас_1}$	$\rho_{к.ас_2}$	δ^*	$\rho_{к.ас_1}$	$\rho_{к.ас_2}$	δ^*	$\rho_{к.ас_1}$	$\rho_{к.ас_2}$	δ^*	$\rho_{к.ас_1}$	$\rho_{к.ас_2}$	δ^*						
0,5	0,5	1	0,515	0,54	-4,63	0,504	0,54	-6,67	0,501	0,53	-5,47	4,88	4,79	1,88	4,97	4,92	4,99	4,92	4,92	1,42
5	5	1	9,73	8,67	12,2	9,93	9,36	11,33	9,98	9,56	4,93	48,54	39,2	23,8	49,62	43,2	14,86	49,90	45,13	10,57
50	50	1	97,04	74,5	30,25	99,23	81,8	21,31	99,81	86,0	16,06	242,56	168,8	43,7	248,08	188,0	31,96	249,51	196,5	26,98
250	250	1	2,57	2,74	-6,2	2,52	2,58	-2,32	2,505	2,52	-0,59	24,4	18,8	29,8	24,84	21,57	15,16	24,96	23,18	7,68
5	25	5	48,66	34,36	41,62	49,65	40,1	23,8	49,91	44,36	12,51	252,68	141,6	71,4	248,11	168,8	46,98	249,52	184,2	35,46
10	50	5	5,15	5,7	-9,6	5,04	5,12	-1,56	5,01	4,9	2,24	0,5	0,5	10	5,10	5,10	39,0	39,0	43,6	2,24
5	50	10	48,8	32,85	48,55	49,69	39,0	27,41	49,92	43,6	14,49	97,3	58,4	66,61	99,3	71,22	39,43	99,82	81,35	22,7
10	100	10	51,49	73,45	-29,9	50,39	63,9	-21,14	50,1	54,2	-7,56	51,49	73,45	-29,9	50,39	63,9	-21,14	50,1	54,2	-7,56

$$* \delta = \frac{\rho_{к.ас_1} - \rho_{к.ас_2}}{\rho_{к.ас_2}} \cdot 100 \%$$

следует, что $\rho_{к.ас}$, вычисленные по формуле (25), всегда завышены при $\rho_{п} > \rho_{вм}$ и занижены при $\rho_{п} < \rho_{вм}$, причем ошибка в определении $\rho_{к.ас}$ может достигать нескольких десятков процентов. При этом она растет с увеличением отношений $\rho_{п}/\rho_{вм}$ и $\rho_{вм}/\rho_{с}$ и уменьшается с увеличением $h/d_{с}$. Поэтому использовать выражения (25) и (26) для вычисления $\rho_{к.ас}$ можно лишь для пластов достаточно большой мощности ($h > 2 \div 5$ м) и не слишком большого отличия удельного сопротивления пласта и вмещающих пород от сопротивления промывочной жидкости, а также для качественного установления общих закономерностей.

Перейдем теперь к одному из актуальнейших вопросов промысловой геофизики — понятию о радиусе исследования.

В настоящее время практически нет методов количественного определения радиуса исследования пород, окружающих ствол скважины конечного диаметра, методами электротометрии. Поэтому качественное суждение о глубинности того или иного зонда обычно получают путем сравнения его показаний с другими зондами, а также по степени влияния на его показания мощности пласта, диаметра и удельного сопротивления зоны проникновения и т.п. В связи с этим представляет интерес количественное определение радиусов исследования градиент-зондов бесконечно большого размера в одиночных пластах ограниченной мощности с учетом всех параметров, характеризующих скважину, пласт и вмещающие его отложения.

Поскольку зонд бесконечно большого размера создает „нормальное” электрическое поле, достигаемая им глубинность исследования будет, очевидно, максимальной для заданного геоэлектрического разреза. В связи с этим радиус исследования градиент-зонда бесконечно большого размера был назван предельным радиусом исследования ($r_{пред}$).

Рассмотрим методику количественного определения $r_{пред}$ градиент-зондов в одиночных пластах ограниченной мощности без и при наличии зоны проникновения.

Из формулы (25) видно, что значение $\rho_{к.ас}$ для пласта без проникновения определяется двумя членами: $\rho_{вм}$ и $(\rho_{п} - \rho_{вм}) \cos \alpha$. В соответствии с [17] первый из этих членов представляет собой вклад в значение $\rho_{к.ас}$ ствола скважины, а второй — вклад самого пласта.

Действительно, если допустить, что радиус скважины равен нулю, то α обратится в 0, а $\cos \alpha$ — в единицу и тогда, согласно формуле (25),

$$\rho_{к.ас} = \rho_{вм} + (\rho_{п} - \rho_{вм}) = \rho_{п}.$$

Таким образом, с исчезновением ствола скважины $\rho_{к.ас}$ определяется только сопротивлением пласта.

Если пласт без проникновения разбить на две части: ближнюю к стволу скважины и ограниченную цилиндрическими поверхностями с радиусами $r_{с}$ и $r_{х}$ и дальнюю, ограниченную цилиндрическими поверх-

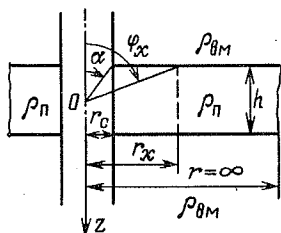


Рис. 15. Схема, поясняющая вывод формул (27) – (31) для пласта без проникновения

ностями с радиусами r_x и $r = \infty$ (рис. 15), то вклад ближней части пласта в общее значение $\rho_{к.ас}$ будет определяться как

$$(\rho_{\Pi} - \rho_{ВМ}) (\cos \alpha - \cos \varphi_x), \quad (27)$$

а вклад дальней части пласта – как

$$(\rho_{\Pi} - \rho_{ВМ}) \cos \varphi_x, \quad (28)$$

где

$$\cos \varphi_x = 0,5/\sqrt{0,25 + (r_x/h)^2}. \quad (29)$$

Из выражений (28) и (29) видно, что с увеличением r_x вклад дальней части пласта в значение $\rho_{к.ас}$ все более убывает.

Условимся под предельным радиусом исследования понимать такое значение r_x , при котором вклад удаленной части пласта равен $\pm 0,1$ от $\rho_{к.ас}$. Так как $\rho_{к.ас}$ – это сопротивление, регистрируемое в „нормальном” электрическом поле с учетом влияния скважины, то такое определение подразумевает влияние на $r_{пред}$ не только самого пласта, но и скважины, что ближе к реальным условиям измерений.

Учитывая данное выше определение и выражения (28) и (29),

$$(\rho_{\Pi} - \rho_{ВМ}) 0,5/\sqrt{0,25 + (r_{пред}/h)^2} = \pm 0,1 \rho_{к.ас}. \quad (30)$$

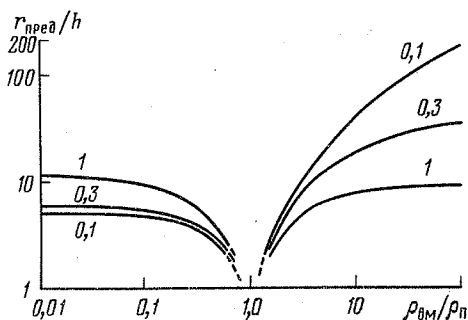
Положительный знак в правой части формулы (30) берется при $\rho_{\Pi} > \rho_{ВМ}$, отрицательный – при $\rho_{\Pi} < \rho_{ВМ}$.

Разрешая уравнение (30) относительно $r_{пред}/h$, получим

$$\frac{r_{пред}}{h} = 5 \sqrt{\left(\frac{\rho_{\Pi} - \rho_{ВМ}}{\rho_{к.ас}}\right)^2 - 0,01}. \quad (31)$$

На рис. 16 приведены кривые $r_{пред}/h = f(\rho_{ВМ}/\rho_{\Pi})$ для постоянных значений r_c/h , рассчитанные по формулам (25) и (31). Относительная величина предельного радиуса исследования $r_{пред}/h$ непроницаемого пласта при любом значении r_c/h становится тем больше, чем значительнее отличается $\rho_{ВМ}/\rho_{\Pi}$ от единицы. При $\rho_{ВМ}/\rho_{\Pi} \rightarrow 1$ понятие предельного радиуса исследования пласта теряет физический смысл, так

Рис. 16. Кривые зависимости $r_{\text{пред}}/h = f(\rho_{\text{ВМ}}/\rho_{\text{П}})$ для пластов без проникновения. Шифр кривых — r_c/h



как пласт как таковой исчезает, поскольку по своей электрической характеристике он становится неотличимым от вмещающих пород.

Из сравнения кривых рис. 16 можно заключить, что с уменьшением r_c/h (т.е. с увеличением относительной мощности пластов) предельный радиус их исследования возрастает при $\rho_{\text{ВМ}}/\rho_{\text{П}} > 1$ и уменьшается при $\rho_{\text{ВМ}}/\rho_{\text{П}} < 1$. При этом для пластов с $h \geq 2 \div 3 r_c$ высокого и низкого удельного сопротивления глубинность исследования при прочих равных условиях не одинакова: меньше в первом и больше во втором случае, что объясняется влиянием скважины.

Для того чтобы убедиться в этом, временно немного видоизменим определение предельного радиуса исследования. Будем понимать под ним такое значение r'_x , при котором вклад в $\rho_{\text{к.ас}}$ удаленной части пласта составляет 0,1 от вклада всего пласта. Такое определение исключает влияние ствола скважины на предельный радиус исследования.

Имея в виду данное определение и то, что вклад всего пласта (без учета влияния скважины) составляет $(\rho_{\text{П}} - \rho_{\text{ВМ}}) \cos \alpha$, а вклад его дальней части $(\rho_{\text{П}} - \rho_{\text{ВМ}}) \cos \varphi_x$, можно записать

$$\cos \alpha / \cos \varphi_x = 10 \quad (32)$$

или, подставив в (32) значения косинусов,

$$\frac{0,5}{\sqrt{0,25 + (r_c/h)^2}} : \frac{0,5}{\sqrt{0,25 + (r'_{\text{пред}}/h)^2}} = 10.$$

Решая это уравнение относительно $r'_{\text{пред}}/h$, получим:

$$r'_{\text{пред}}/h = 10 \sqrt{(r_c/h)^2 + 0,25}. \quad (33)$$

Из последнего выражения следует, что предельный радиус исследования собственно пласта (без учета влияния скважины) полностью определяется его геометрическими параметрами и совершенно не зависит от электрических свойств.

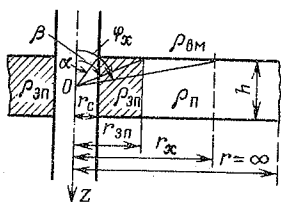


Рис. 17. Схема, поясняющая вывод формул (34) – (38) для пласта с проникновением промывочной жидкости

Таким образом, из сравнения формул (31) и (33) можно сделать вывод о том, что влияние скважины на предельный радиус исследования пласта проявляется через электрические параметры разреза.

Для определения предельного радиуса исследования пластов при наличии зоны проникновения (рис. 17) воспользуемся формулой (26). В правой части этой формулы содержатся три члена. Первый из них по аналогии с предыдущим случаем будем называть вкладом ствола скважины, второй член представляет собой вклад зоны проникновения, а третий отражает вклад в $\rho_{к.ас}$ всей неизменной части пласта от $r = r_{3п}$ до $r = \infty$. С изменением геометрических и электрических параметров пласта с проникновением и сопротивления вмещающих пород вклады в значение $\rho_{к.ас}$ зоны проникновения и неизменной части пласта будут также изменяться, что повлечет за собой изменение предельных радиусов исследования. В связи с этим понятие предельного радиуса исследования для пласта с проникновением промывочной жидкости несколько усложняется по сравнению с непроницаемым пластом.

Если вклад всей неизменной части пласта по абсолютной величине превышает $0,1 \rho_{к.ас}$, то под предельным условимся понимать такой радиус исследования пласта $r_{пред}$, при котором вклад внешней (удаленной) части неизменного пласта в пределах радиуса от $r_{пред}$ до $r = \infty$ равен $\pm 0,1 \rho_{к.ас}$. Если же вклад всей неизменной части пласта по абсолютной величине меньше $0,1 \rho_{к.ас}$, то под предельным радиусом будем понимать $r_{пред}$, при котором суммарный вклад удаленной части зоны проникновения и всего неизменного пласта также равен $\pm 0,1 \rho_{к.ас}$. В связи с таким определением при наличии в плане зоны проникновения для вычисления $\cos \varphi_{пред}$, а затем и $r_{пред}$ необходимо пользоваться следующими вариантами исходных и конечных формул.

Вариант 1:

если

$$(\rho_{п} - \rho_{вм}) \cos \beta > 0,1 \rho_{к.ас}$$

то

$$(\rho_{п} - \rho_{вм}) \cos \varphi_{пред} = 0,1 \rho_{к.ас}, \quad \cos \varphi_{пред} = 0,1 \rho_{к.ас} / (\rho_{п} - \rho_{вм}); \quad (34)$$

вариант 2:

если

$$-0,1 \rho_{\text{к.ас}} < (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{вм}}) \cos \beta < 0,1 \rho_{\text{к.ас}}, \quad (\rho_{\text{зп}} - \rho_{\text{вм}}) > 0,$$

то

$$k(\rho_{\text{зп}} - \rho_{\text{вм}}) (\cos \varphi_{\text{пред}} - \cos \beta) + (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{вм}}) \cos \beta = \rho_{\text{к.ас}},$$

$$\cos \varphi_{\text{пред}} = \frac{0,1 \rho_{\text{к.ас}} + [k(\rho_{\text{зп}} - \rho_{\text{вм}}) - (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{вм}})] \cos \beta}{k(\rho_{\text{зп}} - \rho_{\text{вм}})}; \quad (35)$$

вариант 3:

если

$$-0,1 \rho_{\text{к.ас}} < (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{вм}}) \cos \beta < 0,1 \rho_{\text{к.ас}}, \quad (\rho_{\text{зп}} - \rho_{\text{вм}}) < 0,$$

то

$$k(\rho_{\text{зп}} - \rho_{\text{вм}}) (\cos \varphi_{\text{пред}} - \cos \beta) + (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{вм}}) \cos \beta = -0,1 \rho_{\text{к.ас}},$$

$$\cos \varphi_{\text{пред}} = \frac{-0,1 \rho_{\text{к.ас}} + [k(\rho_{\text{зп}} - \rho_{\text{вм}}) - (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{вм}})] \cos \beta}{k(\rho_{\text{зп}} - \rho_{\text{вм}})}; \quad (36)$$

вариант 4:

если

$$(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{вм}}) \cos \beta < -0,1 \rho_{\text{к.ас}},$$

то

$$(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{вм}}) \cos \varphi_{\text{пред}} = -0,1 \rho_{\text{к.ас}}, \quad \cos \varphi_{\text{пред}} = -0,1 \rho_{\text{к.ас}} / (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{вм}}). \quad (37)$$

Таким образом, $\cos \varphi_{\text{пред}}$ вычисляется для разных вариантов геоэлектрического разреза по разным формулам. Для всех вариантов определяется по одной и той же формуле

$$r_{\text{пред}}/h = \sqrt{(0,5/\cos \varphi_{\text{пред}})^2 - 0,25}, \quad (38)$$

поскольку

$$\cos \varphi_{\text{пред}} = 0,5/\sqrt{0,25 + (r_{\text{пред}}/h)^2}.$$

На рис. 18 и 19 изображены кривые двух типов зависимости $r_{\text{пред}}/h = f(\rho_{\text{вм}}/\rho_{\text{п}})$ для пластов с повышающим и понижающим проникновением, рассчитанные по формулам (34) – (38). Наименьший радиус исследования отмечается в тех случаях, когда $\rho_{\text{вм}}$ мало отличается от $\rho_{\text{п}}$. С уменьшением $\rho_{\text{вм}}/\rho_{\text{п}}$ от единицы $r_{\text{пред}}/h$ в случае повышающего проникновения плавно и непрерывно увеличивается, а в случае понижающего проникновения сначала быстро нарастает, достигая максимума, а затем начинает плавно убывать. При увеличении $\rho_{\text{вм}}/\rho_{\text{п}}$

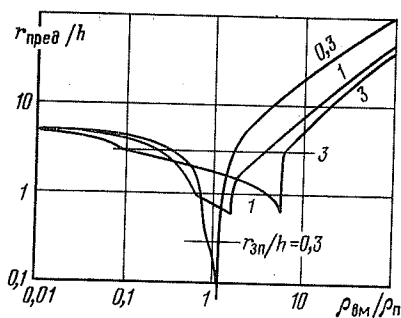


Рис. 18. Кривые зависимости $r_{\text{пред}}/h = f(\rho_{\text{вм}}/\rho_{\text{п}})$ для пласта с повышающим проникновением ($\rho_{\text{зп}}/\rho_{\text{п}} = 10$; $r_{\text{с}}/h = 0,1$). Шифр кривых — $r_{\text{зп}}/h$.

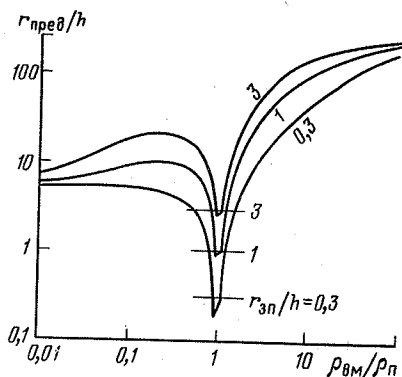


Рис. 19. Кривые зависимости $r_{\text{пред}}/h = f(\rho_{\text{вм}}/\rho_{\text{п}})$ для пласта с понижающим проникновением ($\rho_{\text{зп}}/\rho_{\text{п}} = 0,1$; $r_{\text{с}}/h = 0,1$). Шифр кривых — $r_{\text{зп}}/h$.

от единицы $r_{\text{пред}}/h$ резко нарастает, особенно в случае понижающего проникновения. Увеличение радиуса зоны понижающего проникновения приводит к закономерному возрастанию предельного радиуса исследования при любых значениях отношения $\rho_{\text{вм}}/\rho_{\text{п}}$. В случае повышающего проникновения такое же возрастание наблюдается только при $\rho_{\text{п}}$, близких к $\rho_{\text{вм}}$. При больших и малых значениях $\rho_{\text{вм}}/\rho_{\text{п}}$ и повышающем проникновении с увеличением радиуса последнего предельный радиус исследования не возрастает, а уменьшается.

Рассмотрим, наконец, чему равен предельный радиус исследования одной границы раздела двух сред различного удельного сопротивления.

Измеряемое в скважине при контакте пород с удельными сопротивлениями ρ_1 и ρ_2 [17]

$$\rho_{\text{к}} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} + \frac{\rho_2 - \rho_1}{2} \cos \alpha, \quad (39)$$

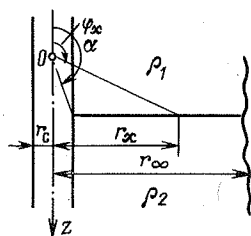
где $\cos \alpha = z/\sqrt{z^2 + r_{\text{с}}^2}$; z — ордината точки измерения, определяемая относительно контакта (рис. 20).

Первое слагаемое в формуле (39) представляет собой вклад в $\rho_{\text{к}}$ ствола скважины, а второе — вклад контакта.

Действительно, если допустить, что скважины нет ($r_{\text{с}} = 0$), то $\alpha = 180^\circ$, а $\cos \alpha = -1$ и тогда, согласно выражению (39),

$$\rho_{\text{к}} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} + \frac{\rho_2 - \rho_1}{2} (-1) = \rho_1.$$

Рис. 20. Схема, поясняющая вывод формулы (41) для двух сред различного удельного сопротивления



Таким образом, без скважины ρ_K определяется только удельным сопротивлением пород, окружающих точку измерения. То же будет наблюдаться и при удалении точки измерения на большое расстояние от контакта.

Если разбить контакт, как это делалось для непроницаемого пласта, на две части: ближнюю к стволу скважины, ограниченную окружностями с радиусами r_1 и r_x , и дальнюю, ограниченную окружностями с радиусами r_x и $r = \infty$ (см. рис. 20), то, очевидно, вклад всего контакта в общее значение ρ_K будет равняться $0,5 (\rho_2 - \rho_1) \cos \alpha$, а вклад его дальней части — $0,5 (\rho_2 - \rho_1) \cos \varphi_x$.

В соответствии с определением, данным выше для непроницаемого пласта, будем считать предельным такой радиус исследования контакта, при котором вклад его дальней части составляет $\pm 0,1 \rho_{K.ac}$. Тогда

$$0,5 (\rho_2 - \rho_1) \cos \varphi_x = \pm 0,1 \rho_{K.ac} \quad (40)$$

или, подставляя в (40) выражение для $\cos \varphi_x$,

$$0,5 (\rho_2 - \rho_1) z / \sqrt{z^2 + r_{пред}^2} = \pm 0,1 \rho_{K.ac}$$

Разрешая это уравнение относительно $r_{пред}$, получим:

$$r_{пред} = 5z \sqrt{[(\rho_2 - \rho_1) / \rho_{K.ac}]^2 - 0,04}. \quad (41)$$

Без учета влияния скважины

$$\frac{\cos \alpha}{\cos \varphi_x} = \frac{z}{\sqrt{z^2 + r_c^2}} : \frac{z}{\sqrt{z^2 + r_x^2}} = 10, \\ r_{пред} / r_c = 10 \sqrt{(z/r_c)^2 + 1}. \quad (42)$$

Как видно из выражения (42), предельный радиус исследования контакта без учета влияния скважины так же, как и у пласта, не зависит от электрических параметров разреза.

Из формул (41) и (42) следует, что предельный радиус исследования контакта прямо пропорционален ординате точки измерения. Объясняется это тем, что с удалением точки измерения от границы раздела двух сред вклад в $\rho_{K.ac}$ ближних участков контакта резко

уменьшается, тогда как вклад, обусловленный дальними участками, остается почти неизменным.

На основании вышеизложенного можно заключить следующее.

1. Кажущееся сопротивление пластов ограниченной мощности при увеличении размеров градиент-зонда до бесконечности стремится к некоторому асимптотическому значению $\rho_{к.ас}$, величина которого зависит от всех без исключения геометрических и электрических параметров разреза. Только в пластах бесконечно большой мощности при $D \neq \infty$ и в пластах ограниченной мощности при отсутствии влияния скважины ($r_c = 0$) $\rho_{к.ас} = \rho_{п}$.

2. Радиус исследования градиент-зонда бесконечно большого размера ограничен некоторым предельным значением $r_{пред}$, величина которого может изменяться в широком диапазоне в зависимости от параметров геоэлектрического разреза. При этом удельные сопротивления среды характеризуют собой влияние скважины, а геометрические параметры разреза – влияние собственно пласта.

§2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАДИЕНТ-ЗОНДОВ БЕСКОНЕЧНО БОЛЬШОГО РАЗМЕРА

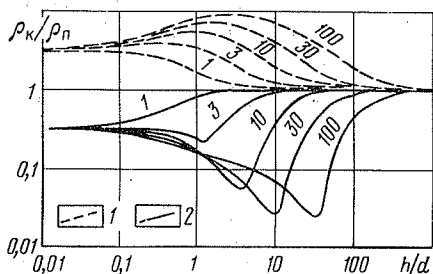
Поскольку, как было установлено в предыдущем параграфе, кажущееся сопротивление, регистрируемое градиент-зондом бесконечно большого размера в пластах ограниченной мощности, в общем случае не равно удельному и зависит от всех геоэлектрических параметров разреза, представляют интерес характеристики такого зонда, которые, очевидно, будут предельными для зондов конечного размера. С этой целью по методике, изложенной в работе [17], для точки, приуроченной к середине пласта, были рассчитаны асимптотические кажущиеся сопротивления для разных геометрических и электрических параметров разреза. По полученным значениям $\rho_{к.ас}$ в свою очередь были построены вертикальная и радиальная характеристики, а также кривые дифференцирующей способности.

Рассмотрим вертикальную характеристику градиент-зонда бесконечно большого размера. Она, как известно, представляет собой зависимость типа $\rho_{к} h / \rho_{к \infty} = f(h/d_c)$ и характеризует искажение показаний зонда конечной мощностью пласта. Так как при измерениях зондом бесконечно большого размера для пласта неограниченной мощности $\rho_{к \infty} = \rho_{п}$, то зависимость $\rho_{к} h / \rho_{к \infty} = f(h/d_c)$ можно записать как $\rho_{к} h / \rho_{п} = f(h/d_c)$.

На рис. 21 приведены два семейства таких кривых, рассчитанных для повышающего и понижающего проникновения промывочной жидкости. Как видно из этого рисунка, оба семейства кривых в левой части стремятся к асимптотам, соответствующим $\rho_{вм} / \rho_{п}$, а в правой –

Рис. 21. Вертикальные характеристики градиент-зонда бесконечно большого размера в условиях:

1 — повышающего проникновения ($\rho_{зп}/\rho_{п} = 10$; $\rho_{п}/\rho_{вм} = 0,33$); 2 — понижающего проникновения ($\rho_{зп}/\rho_{п} = 0,1$; $\rho_{п}/\rho_{вм} = 3,33$); шифр кривых — $r_{зп}/r_c$



к единице. Физически это объясняется тем, что при очень малой по сравнению с диаметром скважины мощности пласта (h/d_c) его влияние практически отсутствует и при измерениях будет сказываться лишь удельное сопротивление вмещающих пород, которые фактически и слагают окружающую зонд среду. Наоборот, при очень большой мощности пласта его можно рассматривать как однородную среду с удельным сопротивлением, равным $\rho_{п}$ при любой конечной величине радиуса зоны проникновения $r_{зп}$.

Поведение кривых между левой и правой асимптотами в случае повышающего и понижающего проникновения несколько различается. В первом случае с увеличением h/d_c значения $\rho_k h/\rho_{п}$ сначала плавно нарастают, достигая максимума, а затем также плавно убывают, сливаясь с правой асимптотой. При этом амплитуда максимума возрастает с увеличением радиуса зоны проникновения, но остается меньше $\rho_{зп}/\rho_{п}$. Во втором случае на вертикальных характеристиках наблюдаются резкие минимумы. Амплитуда минимумов возрастает с увеличением h/d_c , а значения $\rho_k h/\rho_{п}$ в экстремальных точках становятся даже меньше $\rho_{зп}/\rho_{п}$.

Отрыв кривых вертикальных характеристик от левых асимптот практически не зависит от радиуса зоны проникновения, в то время как слияние их с правой асимптотой происходит при тем больших мощностях пластов, чем глубже проникновение промывочной жидкости.

При двухслойном разрезе (кривые с модулем $r_{зп}/r_c = 1$) конфигурация кривых вертикальных характеристик значительно проще: они плавно переходят от значений $\rho_k h/\rho_{п}$, соответствующих левой асимптоте, к своей правой асимптоте. Никаких максимумов или минимумов на них при этом не наблюдается.

Таким образом, на основании анализа вертикальных характеристик сделаем такие выводы:

в случае отсутствия проникновения промывочной жидкости $\rho_{к,ас} = \rho_{п}$ уже при мощностях пластов, в 3–5 раз превышающих диаметр скважины;

при наличии проникновения мощность пластов сказывается на

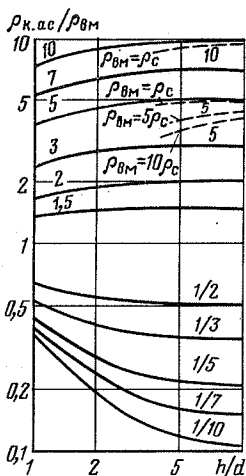


Рис. 23. Кривые дифференцирующей способности градиент-зондов бесконечно большого размера для случая одиночных пластов без проникновения.

Шифр кривых — $\rho_{п}/\rho_{вм}$

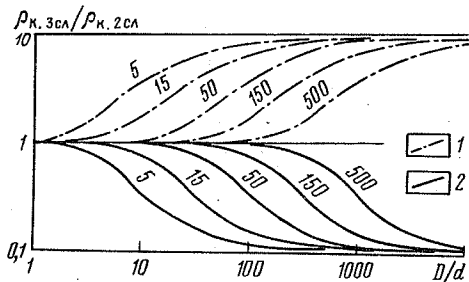


Рис. 22. Радиальные характеристики градиент-зонда бесконечно большого размера в условиях:

1 — повышающего проникновения ($\rho_{п}/\rho_{вм} = 0,33$; $\rho_{зп}/\rho_{п} = 10$); 2 — понижающего проникновения ($\rho_{п}/\rho_{вм} = 3,33$; $\rho_{зп}/\rho_{п} = 0,1$); шифр кривых — h/d_c

регистрируемом $\rho_{к.ас}$ весьма значительно, причем большее влияние оказывает понижающее проникновение.

Радиальные характеристики градиент-зондов бесконечно большого размера как и вертикальные, имеют асимптоты; в левой части с ординатой, равной единице, а в правой — с ординатами, равными $\rho_{зп} = \rho_{п}$ (рис. 22). С физической точки зрения это объясняется тем, что левая часть кривых соответствует неглубокому проникновению промывочной жидкости, когда влияние последней мало и при измерениях фиксируется истинное $\rho_{п}$. Правые ветви кривых, наоборот, соответствуют весьма глубокому проникновению, когда практически весь пласт представляет собой зону проникновения и последняя фактически полностью определяет собой величину $\rho_{к.ас}$.

Поведение радиальных характеристик между левой и правой асимптотами при повышающем и понижающем проникновении сходно. В первом случае отношение $\rho_{к.зсл}/\rho_{к.2сл}$ плавно увеличивается при увеличении D/d_c , в пределе стремясь к $\rho_{зп}/\rho_{п}$, а во втором — наоборот, плавно уменьшается, также стремясь к $\rho_{зп}/\rho_{п}$. Отход кривых от левой и слияние их с правыми асимптотами начинается с тем больших значений D/d_c , чем больше мощность пласта по сравнению с диаметром скважины. При этом в случае понижающего проникновения отход радиальных характеристик от левой асимптоты начинается несколько позже, чем при повышающем.

Проведенный анализ радиальных характеристик позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Наличие зоны проникновения весьма сильно влияет на регистрируемые $\rho_{к.ас}$ и радиус исследования градиент-зондов бесконечно большого размера.

2. Влияние зоны проникновения в общем случае тем больше, чем меньше мощность пласта.

Оценка дифференцирующей способности градиент-зондов бесконечно большого размера осуществлялась с помощью параметра $\rho_{к.ас}/\rho_{вм}$, представляющего собой величину отклонения кривой КС против исследуемого пласта относительно отклонения ее против вмещающих пород.

Дифференцирующая способность градиент-зондов бесконечно большого размера весьма велика, причем она возрастает с увеличением разницы в сопротивлениях пласта и вмещающих пород (рис. 23). С увеличением мощности пласта от 1 до 10 d_c кривые $\rho_{к.ас}/\rho_{вм} = f(h/d_c)$ стремятся к асимптотам, равным $\rho_{п}/\rho_{вм}$. При этом в случае пластов высокого сопротивления подход их к правой асимптоте происходит более плавно по сравнению с пластами низкого сопротивления. Кроме того, в пластах низкого сопротивления при увеличении разницы между $\rho_{п}$ и $\rho_{вм}$ крутизна кривых $\rho_{к.ас}/\rho_{вм} = f(h/d_c)$ возрастает. Все это свидетельствует о большом влиянии мощности пласта на дифференциацию кривых КС в пластах низкого сопротивления, которая тем не менее остается достаточно высокой и позволяет уверенно выделять в разрезе пласты, соизмеримые с диаметром скважины.

Очевидно, что для пластов, залегающих в пачке, дифференцирующая способность будет снижаться по сравнению с одиночным пластом, что связано с взаимным влиянием соседних пластов друг на друга. Однако, как будет показано позже, это влияние начинает проявляться лишь при сравнительно малых мощностях пластов, залегающих в пачке.

Так как рассмотренные кривые рассчитаны для зонда бесконечно большого размера, т.е. по существу для „нормального” поля, то можно считать, что они представляют собой кривые предельной дифференцирующей способности, достижимой с помощью градиент-зондов. При этом следует иметь в виду, что расчет производился для $MN = 0$. Поэтому в реальных условиях, когда $MN \neq 0$, дифференцирующая способность будет меньше, причем тем меньше, чем больше MN будет отличаться от нуля.

Наличие скважины снижает степень дифференциации кривых КС. При этом, чем больше величина отношений $\rho_{п}/\rho_{вм}$ и $\rho_{вм}/\rho_c$, тем меньше дифференциация по сравнению со случаем, когда скважина отсутствует (пунктир на рис. 23).

Очевидно, что наличие проникновения промывочной жидкости может как увеличивать, так и уменьшать дифференцирующую способность. Первое будет наблюдаться при повышающем проникновении в

случае, когда $\rho_{зп} > \rho_{п} > \rho_{вм}$ и при понижающем проникновении, если $\rho_{зп} < \rho_{п} < \rho_{вм}$. Уменьшение дифференцирующей способности будет происходить в случае повышающего проникновения при $\rho_{вм} > \rho_{зп} > \rho_{п}$, а при понижающем проникновении, когда $\rho_{вм} < \rho_{зп} < \rho_{п}$. Если между удельными сопротивлениями пласта, вмещающих пород и зоны проникновения будут наблюдаться соотношения $\rho_{п} > \rho_{вм} > \rho_{зп}$ или $\rho_{п} < \rho_{вм} < \rho_{зп}$, то наличие зоны проникновения промывочной жидкости может вызывать, в зависимости от ее диаметра, как увеличение, так и уменьшение дифференциации кривых $\rho_{к.ас}$.

На основании изложенного выше можно сделать вывод о том, что $\rho_{к.ас}$, регистрируемые градиент-зондом бесконечно большого размера, сильно и неоднозначно зависят от мощности пластов и параметров зоны проникновения. Вместе с установленным ранее неравенством в общем случае асимптотических значений $\rho_{к}$ удельным сопротивлениям пластов ограниченной мощности это позволяет утверждать, что оценка последнего возможна лишь при учете всех параметров, характеризующих разрез и скважину.

§3. ГЛУБИННОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАДИЕНТ-ЗОНДОВ КОНЕЧНОГО РАЗМЕРА

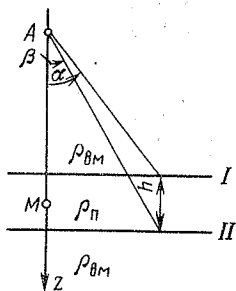
До сих пор рассматривалась глубинность исследования градиент-зондов бесконечно большого размера. Однако для практических целей более важной является возможность количественно оценивать глубинность исследования градиент-зондов конечного размера. Поскольку точное аналитическое решение этой задачи связано с большими трудностями, приведем методику определения радиуса исследования пластов ограниченной мощности градиент-зондами конечного размера, основанную на использовании приближенных формул и данных моделирования.

В работе [34] на основе аналитического решения интегральных уравнений для поверхностей плотности зарядов, возникающих в электрическом поле точечного источника на контакте сред с различными удельными сопротивлениями, выведена формула для определения радиуса исследования одной границы раздела двух сред градиент-установками произвольного размера:

$$r_{и}^2 = 0,5 \left[z_A^2 \left(\sqrt{\frac{b^2}{b^2 - 4}} - 1 \right) - z_M^2 \left(\sqrt{\frac{b^2}{b^2 - 4}} + 1 \right) \right], \quad (43)$$

$$\text{где } b = 1,8 + 0,1 \frac{z_A^2 + z_M^2 + 2}{\sqrt{(1 + z_A^2)(1 + z_M^2)}};$$

Рис. 24. Модель пласта без проникновения и учета влияния скважины



z_A и z_M — координаты соответственно питающего электрода и точки измерения градиент-зонда по оси скважины (в долях ее радиуса), отсчитываемые от плоскости контакта. При этом под глубиной исследования понимается радиус области, дающей 90 % вклада от поля всей поверхности контакта. Напомним, что такое определение не учитывает влияния ствола скважины.

При $z_A \rightarrow \infty$ равенство (43) стремится к уравнению

$$r_{\text{и}} = 10 \sqrt{z_M^2 + 1}, \quad (44)$$

тождественно совпадающему с выведенной ранее формулой (42), что свидетельствует о правомочности подхода, использованного для определения предельных радиусов исследования градиент-зондов (§ 1, гл. II).

Если вместо одной границы раздела взять две, а точку измерений поместить против середины получившегося таким образом пласта (рис. 24), то глубина исследования такого пласта в равной степени будет определяться глубиной исследования каждой из его границ. Но границы пластов I и II находятся на разных расстояниях от электрода А. Поэтому в соответствии с уравнением (43) радиус исследования каждой из его границ будет различным и понятие глубины исследования пласта для трехэлектродного градиент-зонда конечного размера становится неопределенным. Лишь при очень большом по сравнению с мощностью пласта размере градиент-зонда, когда углы α и β (см. рис. 24) становятся практически одинаковыми, радиусы исследования каждой из границ будут равны друг другу и вследствие этого понятие глубины исследования пласта трехэлектродными градиент-зондами становится вполне конкретным и соответствующим приведенному выше определению.

В случае четырехэлектродного градиент-зонда картина существенно изменяется.

Если расположить четырехэлектродный зонд так, чтобы точка измерения находилась против середины одиночного пласта, залегающего в однородной вмещающей среде, то вследствие симметрии зонда

Таблица 4

Радиусы исследования четырехэлектродных градиент-зондов
конечного размера в пластах ограниченной мощности

L/h	L/r_c	h/r_c	z_A/r_c	z_M/r_c	r_W/r_c	r_W/h
1	2	3	4	5	6	7
1,2	24	20	14	10	18,27	0,91
	48	40	28	20	36,54	0,91
	96	80	56	40	73,08	0,91
2	192	160	112	80	146,16	0,91
	40	20	30	10	25,74	1,29
	80	40	60	20	51,49	1,29
5	160	80	120	40	102,98	1,29
	320	160	240	80	205,95	1,29
	100	20	90	10	43,06	2,15
10	200	40	180	20	86,12	2,15
	400	80	360	40	172,24	2,15
	800	160	720	80	344,49	2,15
20	200	20	190	10	57,40	2,87
	400	40	380	20	114,80	2,87
	800	80	760	40	229,61	2,87
50	1600	160	1520	80	459,22	2,87
	400	20	390	10	71,13	3,56
	800	40	780	20	142,27	3,56
100	1600	80	1560	40	284,53	3,56
	3200	160	3120	80	569,07	3,56
	1000	20	990	10	85,35	4,27
∞*	2000	40	1980	20	170,69	4,27
	4000	80	3960	40	340,48	4,26
	8000	160	7920	80	679,76	4,25
∞**	2000	20	1990	10	91,88	4,59
	4000	40	3980	20	183,16	4,58
	8000	80	7960	40	365,98	4,57
∞***	16 000	160	15 920	80	731,62	4,57
	∞	20	∞	10	100,5	5,025
	∞	40	∞	20	200,25	5,006
∞***	∞	80	∞	40	400,12	5,001
	∞	160	∞	80	800,06	5,000
	∞	20	∞	—	—	5,025
∞***	∞	40	∞	—	—	5,006
	∞	80	∞	—	—	5,001
	∞	160	∞	—	—	5,000

* Вычислено по формуле (44).

** Вычислено по формуле (33).

и геоэлектрического разреза относительно середины пласта глубинность исследования каждой из его границ будет совершенно одинакова. При этом радиус исследования пласта будет равен глубинности исследования любой из его границ, определяемой выражением (43), при положении токового электрода на ближайшем от этой границы расстоянии, т.е. когда он расположен во вмещающей среде со стороны этой границы.

Радиусы исследования четырехэлектродных градиент-зондов конечного размера вычислены по формуле (43) для четырех пластов разной мощности, предельные радиусы исследования подсчитаны по формулам (33) и (44) (табл. 4). Относительные (в долях мощности пласта h) радиусы исследования четырехэлектродных градиент-зондов в пластах разной мощности совершенно одинаковы при одном и том же значении отношения L/h . При этом с увеличением L/h они стремятся к предельному радиусу исследования, величина которого при вычислении разными способами полностью совпадает.

Отмеченные особенности подтверждают правомочность определения радиусов исследования четырехэлектродных градиент-зондов конечного размера в одиночных пластах ограниченной мощности с помощью выражения (43), но оно не учитывает влияние скважины. В связи с этим для определения радиуса исследования четырехэлектродных градиент-зондов конечного размера с учетом влияния скважины воспользуемся следующими соображениями.

В гл. II, § 1 было установлено, что формулы (31) и (33) позволяют вычислить предельный радиус исследования соответственно с учетом и без учета влияния скважины. Следовательно, если определить предельные радиусы исследования с помощью выражений (31) и (33), то разница между ними будет количественно характеризовать собой влияние скважины на предельный радиус исследования.

Забегая несколько вперед (см. гл. III, § 1), укажем, что скважина в процентном отношении оказывает практически одинаковое (при неизменных параметрах пласта и вмещающих пород) влияние на ρ_k , регистрируемые четырехэлектродными градиент-зондами с $L/h \geq 1,5 \div 3$ независимо от их размера. Поэтому разницу (в %) между предельными радиусами исследования, вычисленными с учетом и без учета влияния скважины, можно распространить и на градиент-зонды конечного размера.

На основании этого была рассчитана и построена палетка для определения радиусов исследования четырехэлектродных градиент-зондов конечного размера (рис. 25), построение которой производилось следующим образом.

Вначале с помощью формулы (43) для разных значений L/h определялись отношения r_{ii}/h без учета влияния скважины. Затем по форму-

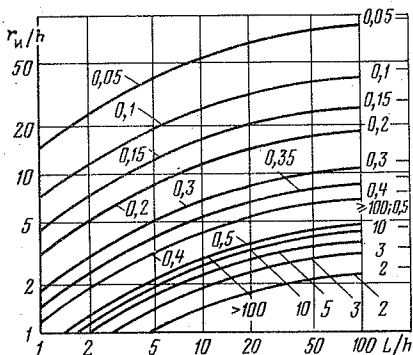


Рис. 25. Палетка для определения радиуса исследования одиночных непроницаемых пластов ограниченной мощности четырехэлектродными градиент-зондами конечного размера. Шифр кривых — $\rho_{\text{п}}/\rho_{\text{вм}}$

лам (31) и (33) вычислялись отношения $r'_{\text{пред}}/h$ и $r_{\text{пред}}/h$ с учетом и без учета влияния скважины и для разных электрических параметров пласта и вмещающих пород определялось отношение $r_{\text{пред}}/r'_{\text{пред}}$. И, наконец, умножая ранее вычисленные значения r_w/h на отношение $r_{\text{пред}}/r'_{\text{пред}}$, получали радиусы исследования для зондов ограниченных размеров с учетом влияния скважины r_w/h , по которым и строились кривые палетки.

Палетка представляет собой набор кривых зависимости $r_w/h = f(L/h)$ для разных значений $\rho_{\text{п}}/\rho_{\text{вм}}$. В правой части ее штрихами нанесены предельные радиусы исследования, соответствующие каждому из значений $\rho_{\text{п}}/\rho_{\text{вм}}$.

Как следует из рис. 25, в левой части палетки, при сравнительно малых величинах L/h , кривые $r_w/h = f(L/h)$ идут более круто к оси абсцисс, начиная выполаживаться при $L/h > 20$. При этом радиусы исследования пластов высокого и низкого сопротивления неодинаковы при одной и той же величине L/h : меньше в первом и больше во втором случае. При сопротивлении пласта $\rho_{\text{п}} \geq 100 \rho_{\text{вм}}$ зависимость радиуса исследования пласта от относительного (в долях h) размера зонда остается неизменной. Кроме того, эта же кривая соответствует значению $\rho_{\text{п}}/\rho_{\text{вм}}$, равному 0,5.

Как отмечалось, при вычислении $r_{\text{пред}}/h$ с помощью выражения (31) использовалось значение $\rho_{\text{к.ас}}$, которое подсчитывалось по приближенной формуле (25). Поэтому для оценки погрешности определения предельных радиусов исследования по формуле (31) $r_{\text{пред.ф}}$ по ней же подсчитывались предельные радиусы исследования при использовании $\rho_{\text{к.ас}}$, полученных на электроинтеграторе ЭКСМ ($r_{\text{пред.ЭКСМ}}$). Результаты этих вычислений приведены в табл. 5.

Из анализа этой таблицы следует, что ошибка в определении $r_{\text{пред}}$, вычисленного с использованием приближенного значения $\rho_{\text{к.ас}}$, при мощности пластов $h \geq 3$ м ($h/d_c \geq 16$), как правило, не превышает 20%. При этом она увеличивается с повышением $\rho_{\text{п}}/\rho_{\text{с}}$ и особенно —

Таблица 5

Сопоставление предельных радиусов исследования, рассчитанных по формуле (31), с использованием $\rho_{к.ас.}$ вычисленных по формуле (25) и полученных на электроинтеграторе ЭКСМ

$\rho_{П}/\rho_{ВМ}$	$\rho_{П}/\rho_{С}$	$\rho_{ВМ}/\rho_{С}$	h/d	$\rho_{к.ас.}$ Ом·м		$r_{пред.ф.}$	$r_{пред.ЭКСМ}$	$\Delta^*, \%$
				по формуле (25)	по данным ЭКСМ	h	h	
0,1	10	100	16	10,16	12,7	44,28	36,58	-21,05
0,1	10	100	4	12,69	38,34	35,46	11,73	-202,3
0,1	1	10	16	1,016	1,01	44,29	44,55	0,58
0,1	1	10	4	1,27	1,39	35,43	32,37	-9,45
0,5	0,5	1	16	0,501	0,53	4,965	4,69	-5,86
0,5	0,5	1	4	0,515	0,54	4,83	4,6	-5,0
0,5	5	10	16	5,009	4,9	4,96	5,08	2,36
0,5	5	10	4	5,149	5,7	4,83	4,36	-10,78
0,5	50	100	16	50,09	54,2	4,96	4,58	-8,3
0,5	50	100	4	51,49	73,45	4,83	3,37	-43,3
10	10	1	16	9,98	5,59	4,48	4,66	3,86
10	10	1	4	9,73	8,67	4,6	5,166	10,96
10	50	5	16	49,92	44,36	4,48	5,05	11,29
10	50	5	4	48,65	34,36	4,6	6,53	12,6
10	100	10	16	99,84	81,35	4,48	5,51	18,69
10	100	10	4	97,31	58,4	4,6	7,69	40,18
10	250	25	16	249,57	167,3	4,48	6,7	33,13
10	250	25	4	242,83	112,05	4,6	10,03	54,14
100	100	1	16	99,82	86,0	4,93	5,73	13,96
100	100	1	4	97,04	74,5	5,08	6,62	23,26
250	250	1	16	249,55	196,5	4,96	6,32	21,52
250	250	1	4	242,56	168,8	5,11	7,36	30,57

*

$$\Delta = \frac{r_{пред.ЭКСМ} - r_{пред.ф.}}{r_{пред.ЭКСМ}}$$

$\rho_{ВМ}/\rho_{С}$. Уменьшение мощности пласта ведет к возрастанию величины ошибки, особенно при больших отношениях удельного сопротивления пласта и вмещающих пород к сопротивлению промывочной жидкости.

Несмотря на то, что палетка (см. рис. 25) построена по приближенным значениям $r_{И}/h$, она, тем не менее, впервые для методов электрометрии позволяет количественно определять глубинность исследования одиночных непроницаемых пластов ограниченной мощности четырехэлектродными градиент-зондами конечного размера с учетом

всех геометрических и электрических параметров пласта и вмещающих пород.

Пользуясь описанной методикой и значениями $\rho_{к.ас}$, полученными на электроинтеграторе ЭКСМ, можно построить более точные палетки. Точно так же можно, используя эту методику и $\rho_{к.ас}$, вычисленные по формуле (26) или полученные моделированием на электроинтеграторе, построить аналогичные палетки для одиночных пластов с проникающей промывочной жидкостью.

До сих пор рассматривались одиночные пласты, залегающие в однородных вмещающих породах. В то же время в реальных условиях разрез скважин обычно сложен чередованием пластов равной мощности и сопротивления, создающим его анизотропию. Более того, даже однородные в литологическом отношении породы во многих случаях обладают анизотропией. Так, например, карбонатные отложения часто характеризуются сильной анизотропией, обусловленной ориентированной в одном преимущественном направлении трещиноватостью [25, 29]. Однако даже в случае однородных изотропных пластов при использовании градиент-зондов большого размера в большинстве случаев приходится иметь дело с макроанизотропным разрезом, поскольку зонд охватывает значительный интервал его, состоящий из целого ряда пластов разной мощности и сопротивления. При этом коэффициент анизотропии может достигать десяти и более единиц.

В гл. I, § 3 было показано, что при использовании четырехэлектродных градиент-зондов в районе точки измерений образуется область квазиоднородного поля, ширина которой зависит от размера зонда, а радиус определяется коэффициентом анизотропии. Совершенно очевидно, что для достижения максимальной глубинности и наибольшего приближения регистрируемых кажущихся сопротивлений к $\rho_{к.ас}$ квазиоднородное электрическое поле должно простирается от ствола скважины на расстояние, не меньшее предельного радиуса исследования, а пласт по мощности не должен выходить за пределы квазиоднородного поля по оси z . Палетки на рис. 25 и 10 позволяют в каждом конкретном случае определить, в какой области электрического поля находится тот или иной пласт в момент измерений. Так, для пласта с $\rho_{п}/\rho_{вм} = 100$ $r_{пред}/h = 5$ (см. рис. 25). Допустим, что пласт имеет мощность 4 м. Следовательно, предельный радиус исследования его будет равен 20 м. Если для измерений используется четырехэлектродный градиент-зонд с $L = 25$ м, то квазиоднородное поле, создаваемое им, по вертикали будет распространяться на 9 м, а по радиусу от скважины (при $\lambda = 1$) — на 6,75 м. Последнего недостаточно для того, чтобы получать против такого пласта $\rho_{к}$, близкие к $\rho_{к.ас}$. Если же коэффициент анизотропии разреза равен 5, то квазиоднородное поле будет простирается по радиусу от скважины на 33,5 м, что вполне достаточ-

но, чтобы получать против такого пласта ρ_{Π} , максимально приближенные к $\rho_{к.ас}$.

Наибольшая мощность, при которой пласт не будет выходить за пределы области квазиоднородного поля при размере зонда, равного 25 м, составляет 9 м. При такой мощности пласта и сопротивлении его, определяемом отношением $\rho_{\Pi}/\rho_{ВМ} = 100$, предельный радиус исследования составит 45 м. Для того чтобы такой пласт целиком попадал в область квазиоднородного поля, коэффициент анизотропии охватываемой зондом части разреза должен быть не менее 7.

Описанная выше методика количественного определения радиусов исследования четырехэлектродных градиент-зондов позволяет установить оптимальный размер его для каждой конкретной геоэлектрической ситуации.

Глава III

ВЛИЯНИЕ РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ИЗМЕРЕНИЯ НА ПОКАЗАНИЯ ГРАДИЕНТ-ЗОНДОВ БОЛЬШОГО РАЗМЕРА

Как было показано в предыдущих главах, для существенного увеличения глубинности исследования при сохранении высокой дифференцирующей способности регистрируемых кривых КС наиболее целесообразно использование четырехэлектродных градиент-зондов с большим расстоянием между токовыми электродами АВ и малыми разностями MN. В то же время было установлено, что даже в квазиоднородном электрическом поле регистрируемое кажущееся сопротивление в общем случае не равно удельному. В связи с этим рассмотрим основные факторы, влияющие на результаты измерений градиент-зондами (трех- и четырехэлектродными) большого размера, а также количественно оценим каждый из них.

Основными причинами, вызывающими расхождение между измеряемыми значениями $\rho_{к}$ и истинными удельными сопротивлениями пород ρ_{Π} , являются:

- 1) наличие ствола скважины, заполненного промывочной жидкостью с удельным электрическим сопротивлением $\rho_{с}$, отличным от ρ_{Π} ;
- 2) конечное расстояние между парными электродами градиент-зонда;
- 3) повышающее и понижающее экранирование, обусловленное близостью пластов отличного от вмещающих пород сопротивления к токовым электродам зонда;

4) макро- и микроанизотропия толщи пород, находящейся в пределах измерительной установки (зонда).

Рассмотрим влияние перечисленных факторов на кривые КС, регистрируемые градиент-зондами.

§ 1. СТВОЛ СКВАЖИНЫ

Влияние скважины на кажущиеся сопротивления, регистрируемые в пластах, мощность которых превосходит размеры градиент-зонда, хорошо изучено и может быть определено по палеткам БЭЗ, из рассмотрения которых следует, что искажающее влияние скважины тем меньше, чем больше L/d_c и меньше ρ_{Π}/ρ_c . Поэтому при использовании больших градиент-зондов с $L/d_c > 40+100$) влияние скважины в мощных пластах конечного сопротивления становится пренебрежимо малым, даже если в них имеется зона проникновения промывочной жидкости.

В случае одиночных пластов, мощность которых меньше размера зонда, влияние скважины проявляется совершенно иначе.

В предыдущей главе было показано, что в одиночных пластах ограниченной мощности при увеличении размера градиент-зонда до бесконечности кажущееся сопротивление в общем случае стремится к $\rho_{к.ас}$, зависящему от всех электрических и геометрических параметров разреза, и лишь при отсутствии скважины $\rho_{к.ас} = \rho_{\Pi}$. Так как при отсутствии скважины кажущееся сопротивление пласта ограниченной мощности при увеличении размера зонда до бесконечности стремится к его удельному сопротивлению, а в случае наличия скважины — к асимптотическому кажущемуся сопротивлению, то, очевидно, разница между ними представляет собой количественную меру влияния скважины.

Приведенные в гл. II, § 1 формулы, с помощью которых можно вычислить $\rho_{к.ас}$ для одиночного пласта с учетом влияния скважины, являются приближенными. Поэтому во ВНИИ Геофизике на электроинтеграторе ЭКСМ был экспериментально получен ряд асимптотических значений кажущегося сопротивления для одиночных пластов без проникновения [6], по которым были построены кривые зависимости $\rho_{к.ас}/\rho_c = f(\rho_{\Pi}/\rho_c)$ при $\rho_{вм}/\rho_c$ и $h/d_c = \text{const}$ (рис. 26). Анализ этих кривых дает такие выводы:

1) разница между $\rho_{к.ас}$ и ρ_{Π} тем больше, чем больше отличается удельное сопротивление пласта от удельного сопротивления промывочной жидкости и чем меньше мощность пласта по сравнению с диаметром скважины;

2) при $\rho_{\Pi} > \rho_{вм}$ $\rho_{к.ас}$ всегда меньше ρ_{Π} , при $\rho_{\Pi} < \rho_{вм}$ $\rho_{к.ас}$ всегда больше ρ_{Π} , при $\rho_{\Pi} = \rho_{вм}$ $\rho_{к.ас} = \rho_{\Pi}$;

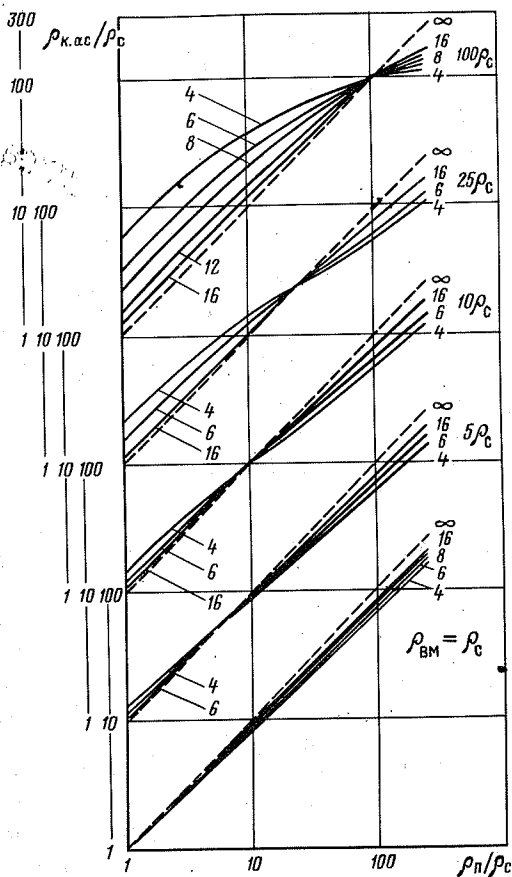


Рис. 26. Кривые зависимости $\rho_{к.ас}/\rho_c = f(\rho_n/\rho_c)$.
Шифр кривых — h/d_c

3) при увеличении разницы в удельных сопротивлениях вмещающих пород и промывочной жидкости влияние мощности пласта на степень отлчия $\rho_{к.ас}$ от ρ_n возрастает;

4) при $\rho_n > \rho_{вм}$ разница между удельным и асимптотическим кажущимися сопротивлениями больше, чем при $\rho_n < \rho_{вм}$.

Таким образом, хотя разница между асимптотическим и удельным сопротивлениями и является мерой влияния скважины, численные значения ее зависят буквально от всех геометрических и электрических параметров разреза.

Физически влияние скважины и отмеченные закономерности объясняются следующим.

При отсутствии скважины плотность тока однородного электрического поля при любой дифференциации разреза по сопротивлениям остается неизменной по величине и нормальной к плоскостям напластования. При наличии скважины с удельным сопротивлением промывочной жидкости ρ_c , отличным от сопротивления пород, плотность тока в скважине против пластов высокого сопротивления должна увеличиваться. В результате этого токовые линии электрического поля будут искривляться у границ раздела, чтобы сгуститься в скважине против пластов высокого сопротивления [3]. Искривление токовых линий у границ пласта является причиной появления радиальной составляющей плотности тока, которая обуславливает образование на стенке скважины вблизи границ пласта поверхностных электрических зарядов [5]. Вклад этих зарядов в регистрируемую против пласта напряженность и определяет собой влияние скважины.

Очевидно, что с увеличением мощности пласта токовые линии против его средней части будут идти все более параллельно стенкам скважины, в результате чего радиальная составляющая плотности тока и, соответственно, плотность электрических зарядов на стенках скважины уменьшаются, ослабляя ее влияние.

Увеличение разницы в сопротивлениях промывочной жидкости и пород, слагающих стенки скважины, приводит к увеличению плотности тока в последней. В результате этого большая часть токовых линий из окружающей среды будет переходить, искривляясь у границ пласта, в скважину (или из нее в окружающую среду). Это приводит к увеличению плотности электрических зарядов на стенках скважины и, следовательно, ее влияния на регистрируемые ρ_k . При совпадении значений сопротивлений пласта и вмещающих пород электрическая граница раздела между ними будет отсутствовать. В результате этого искривления токовых линий и возникновения электрических зарядов на стенках скважины наблюдаться не будет и регистрируемое ρ_k будет равно ρ_n .

Наконец, в пластах низкого сопротивления вследствие меньшей контрастности между ρ_c и ρ_n плотность электрических зарядов на стенках скважины и, соответственно с этим, влияние скважины на измеряемые кажущиеся сопротивления будет меньше, чем в случае пластов высокого сопротивления.

Различный характер влияния скважины на кажущиеся сопротивления, регистрируемые градиент-зондами большого размера против пластов бесконечно большой и конечной мощности, проявляется не только в том, что при неограниченном увеличении зонда в первом случае ρ_k стремится к удельному сопротивлению пласта, а во втором — к асимптотическому кажущемуся сопротивлению.

Как отмечалось выше, в пластах бесконечной мощности влияние ствола скважины при увеличении размера зонда закономерно умень-

Таблица 6

L/h	$\rho_{к.ТП-2}/\rho_{ВМ}$	$\rho_{к.ЭКЗ}/\rho_{ВМ}$	$\frac{\rho_{к.ТП-2} - \rho_{к.ЭКЗ}}{\rho_{к.ТП-2}}, \%$
1,5	5,0	4,9	2,0
2	5,6	4,8	14,3
3	6,7	5,3	20,9
5	9,0	7,2	20,0
6,5	10,2	7,9	22,5
8	11,7	9,4	19,7
∞	50,0	39,2	21,6

шается, исчезая совсем при размерах зонда тем меньших, чем меньше разница в удельных сопротивлениях пласта и промывочной жидкости. В случае одиночных пластов ограниченной мощности эта закономерность не соблюдается.

В табл. 6 дано сопоставление кажущихся сопротивлений, снятых с правой ветви одной из кривых ЭКЗ ($\rho_{п} = 50 \rho_{с}; \rho_{ВМ} = \rho_{с}; h = 4 d$) и кривой палетки ТП-2 с тем же модулем $\rho_{п}/\rho_{ВМ}$. Как видно из этой таблицы, начиная с $L/h = 3$ относительное отклонение кривой ЭКЗ от кривой палетки ТП-2 остается практически неизменным. При этом оно соответствует относительному отклонению $\rho_{к.ас}$ от $\rho_{п}$. Незначительные расхождения в отклонениях отдельных точек кривых не выходят за пределы точности отсчета кажущихся сопротивлений с палеток. По мере увеличения мощности пласта по сравнению с диаметром скважины кривые ЭКЗ располагаются все ближе к кривой палетки ТП-2, сливаясь с последней при тем меньшей мощности пласта, чем меньше разница между $\rho_{п}$ и $\rho_{ВМ}$, а также между $\rho_{ВМ}$ и $\rho_{с}$. В случае четырехэлектродных градиент-зондов большого размера интервал, на котором кривые $\rho_{к}/\rho_{ВМ} = f(L/h)$ с учетом и без учета влияния скважины идут параллельно друг другу, возрастает, а относительная мощность пласта $h/d_{с}$, при которой они сливаются друг с другом, уменьшается (рис. 27, а).

Факт параллельности кривых зондирования пластов ограниченной мощности с учетом и без учета влияния скважины объясняется тем, что при больших размерах зонда пласт попадает в область квазиоднородного электрического поля, из которой при неизменных параметрах пласта и вмещающих пород в скважину ответвляется одна и та же доля протекающего через нее тока. Так как контрастность границы раздела между скважиной и пластом, а также скважиной и вмещающими породами остается неизменной, а доля тока, ответвляющегося в скважину, постоянна по отношению к току, текущему в породах на уровне пласта, то, очевидно, и относительное расхождение между кривыми с учетом и без учета влияния скважины будет неизменным вне зависимости от размера зонда. При достаточно большой мощности

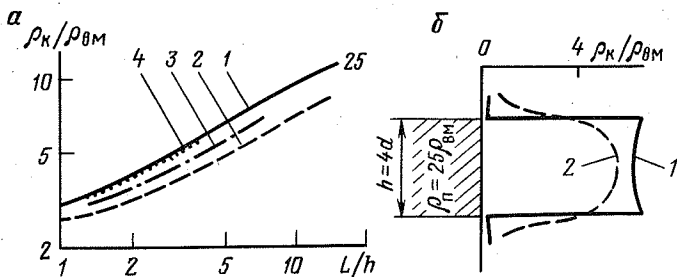


Рис. 27. Влияние ствола скважины на показания четырехэлектродных градиент-зондов большого размера:

a — кривые зондирования по результатам моделирования на ЭКСМ: 1 — без учета влияния скважины при h , равных соответственно $2d_c$, $4d_c$ и $8d_c$; 2 — 4 — с учетом влияния скважины соответственно при h , равных $2d_c$, $4d_c$ и $8d_c$; *b* — кривые КС: 1 — без учета влияния скважины, 2 — с учетом влияния скважины

пласта, когда в удалении от его границ ток в скважине распространяется параллельно ее стенкам, радиальная составляющая плотности тока (и определяемое ею влияние) будет отсутствовать.

В связи с изложенным относительный размер зонда, с которого начинается параллельный ход кривых $\rho_K/\rho_{ВМ} = f(L/h)$ с учетом и без учета влияния скважины, можно считать оптимальным для одиночного пласта данной мощности и сопротивления, так как он испытывает такое же влияние скважины, как и зонд бесконечно большого размера.

Параллельность кривых зондирования с учетом и без учета влияния скважины и соответствие относительного расхождения их величины $(\rho_{П} - \rho_{к.ас})/\rho_{П}$ позволяет упростить учет влияния скважины на показания градиент-зондов большого размера в пластах ограниченной мощности, а также легко продолжить правые ветви кривых палеток ЭКЗ и ЭКЗТ (см. гл. V).

Что касается влияния скважины на конфигурацию кривых КС четырехэлектродных градиент-зондов, то оно, как и у трехэлектродных, проявляется в сглаживании резких изломов кривых, приуроченных к границам пласта (рис. 27, б). При этом сама кривая КС вследствие симметрии зонда также симметрична относительно середины пласта.

Интервал в области границ пласта, на котором наблюдаются искажения кривой КС, связанные с влиянием скважины, можно оценить с помощью кривых зависимости $\rho_{к.ас}/\rho_c = f(\rho_{П}/\rho_c)$ (см. рис. 26). Этот интервал увеличивается с ростом отношений $\rho_{П}/\rho_{ВМ}$ и $\rho_{ВМ}/\rho_c$ и уменьшается с увеличением отношения h/d_c .

Учитывая симметрию кривой КС четырехэлектродных зондов, а также то, что у границ пласта наиболее сильно сказывается влияние скважины, характерным для них следует считать ρ_K , отсчитанное в

центре пласта, так как здесь оно будет ближе всего к кажущемуся сопротивлению без учета влияния скважины. В случае трехэлектродных градиент-зондов большого размера вследствие сходства регистрируемых ими кривых с кривыми КС четырехэлектродных зондов отсчет ρ_K целесообразно производить в тех же точках.

Границы пластов повышенного по сравнению с вмещающими породами сопротивления при достаточно большой ($h > 3+5 d_c$) мощности пласта соответствуют точкам перегиба на кривой КС. При уменьшении мощности пласта, а также разницы между удельными сопротивлениями пласта и вмещающих пород точки кривой КС, соответствующие границам пласта, смещаются к экстремуму тем больше, чем меньше h по сравнению с d_c и чем меньше ρ_{II} отличается от ρ_{BM} (см. гл. IV).

Таким образом, основные выводы заключаются в следующем.

1. В пластах малой мощности ствол скважины оказывает практически одинаковое (в процентном отношении) влияние на ρ_K больших градиент-зондов независимо от их размеров. Количественной мерой этого влияния является разница между удельным и асимптотическим кажущимся сопротивлениями пласта.

2. Наиболее характерным значением кажущегося сопротивления на кривых КС, регистрируемых градиент-зондами большого размера, является ρ_K , отсчитанное в точках, соответствующих серединам пластов.

3. Границы пластов на кривых КС, зарегистрированных трех- и четырехэлектродными градиент-зондами большого размера, следует определять по точкам перегиба.

§ 2. КОНЕЧНОЕ РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ПАРНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

В четырехэлектродных градиент-зондах типа АМНВ приходится иметь дело с двумя системами парных электродов: токовыми и измерительными.

Для выяснения влияния конечного расстояния между токовыми электродами четырехэлектродного градиент-зонда на ρ_K , регистрируемые в одиночных пластах ограниченной мощности, на ЭВМ была рассчитана палетка зависимости $\rho_{K,CP}/\rho_{BM} = f(L/h)$ (где $\rho_{K,CP}$ — кажущееся сопротивление, характерное для середины пласта) при $\rho_{II}/\rho_{BM} = \text{const}$ (рис. 28), аналогичная палетке ТП-2. При $\rho_{II} > \rho_{BM}$ кажущиеся сопротивления занижаются по сравнению с удельным, а при $\rho_{II} < \rho_{BM}$ — завышаются. Величины этих завышений и занижений определяются отношениями ρ_{II}/ρ_{BM} и L/h . Иначе говоря, зависимость регистрируемых четырехэлектродными градиент-зондами кажущихся сопротивлений от параметров разреза в случае одиночного пласта качественно анало-

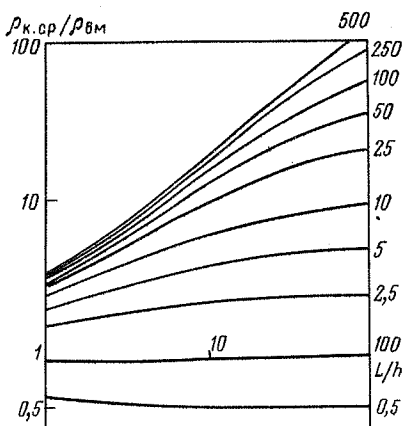


Рис. 28. Кривые зависимостей $\rho_{к.ср}/\rho_{вм} = f(L/h)$ без учета влияния скважины, построенные по значениям $\rho_{к.ср}$ против середины одиночного пласта. Шифр кривых — $\rho_{п}/\rho_{вм}$

гична таковой для трехэлектродных зондов. Количественно эти зависимости для соответствующих зондов определяются палетками (см. рис. 28) и ТП-2.

На конфигурации кривых КС четырехэлектродных градиент-зондов большого размера конечное расстояние между токовыми электродами (при $L > h$) практически не сказывается. Это связано с тем, что, как было показано в предыдущем параграфе, начиная с $L = 1,5 \div 3 h$, в скважину из окружающей среды независимо от размера зонда отводится одна и та же доля тока, текущего на уровне точки измерения. Поэтому искажения участков кривой КС, приуроченных к границам пласта, обусловленные влиянием скважины, остаются неизменными вне зависимости от расстояния между токовыми электродами зонда.

Конечное расстояние между измерительными электродами градиент-зонда приводит к сглаживанию кривой КС на участках ее резких изломов. Вследствие этого даже при отсутствии влияния скважины на границах пластов с разными удельными сопротивлениями вместо скачкообразного изменения ρ_k на диаграммах наблюдались бы зоны плавного изменения кажущегося сопротивления, ширина которых равна удвоенному расстоянию между измерительными электродами градиент-зонда. Иными словами, неидеальность градиент-зонда сказывается на конфигурации кривых КС качественно так же, как и влияние ствола скважины. На величине кажущегося сопротивления, отсчитываемого против середины пласта достаточно большой мощности ($h > 2MN$), неидеальность градиент-зонда, особенно большого размера, практически не сказывается.

С целью обеспечения высокой расчленяющей способности разреза и исключения погрешностей регистрации кажущегося сопротивления тонких пластов при практической реализации измерений в скважинах градиент-зондами большого размера желательно применять минималь-

но возможные расстояния между измерительными электродами. При больших разносах между питающими электродами это приводит к необходимости использования специальной аппаратуры.

§ 3. ЭКРАНИРОВАНИЕ

Одним из важнейших свойств, характеризующих тот или иной метод промысловой геофизики, является зависимость его показаний от экранных влияний. В методах электрометрии на постоянном токе под экранированием обычно понимаются искажения кажущихся сопротивлений, вызываемые электрическими неоднородностями разреза, расположенными в области токовых или измерительных электродов зонда. При этом оно может быть обусловлено как самим исследуемым, так и другими пластами, присутствующими в разрезе. В зависимости от сопротивления этих пластов и их расположения относительно электродов зонда экранирование может быть повышающим и понижающим. В первом случае при наличии электрических неоднородностей в районе токовых электродов кажущееся сопротивление исследуемого пласта повышено по сравнению с ρ_k при отсутствии таких неоднородностей, а во втором — понижено. При этом экранирование характеризуется двумя параметрами: амплитудой, определяющей собой степень искажения ρ_k неоднородностями разреза, и интервалом, на котором эти искажения проявляются.

Известно [15], что у обычных трехэлектродных градиент-зондов экранирование отчетливо проявляется как в пределах пласта, так и за его границами в виде экранных максимумов и минимумов. При этом интервал экранирования примерно равен размеру зонда, а амплитуда его тем больше, чем больше удельное сопротивление пласта отличается от сопротивления вмещающих пород, а также чем меньше диаметр скважины и размер зонда по сравнению с мощностью пласта.

Так как четырехэлектродный градиент-зонд типа AMNB представляет собой комбинацию двух трехэлектродных (последовательного AMN и обращенного MNB), то ρ_k в каждой точке его кривой КС на основании принципа суперпозиции полей может быть получено как полусумма кажущихся сопротивлений, регистрируемых в той же точке последовательным и обращенным зондами, построенными на базе использованного четырехэлектродного зонда. Вследствие этого экранные максимумы и минимумы в определенной степени компенсируют друг друга, что приводит к уменьшению их амплитуды.

Однако полностью этим влияние экранирования не снимается. Поэтому кривые КС четырехэлектродных зондов, хотя и меньше, чем трехэлектродных, все же испытывают влияние экранирования. В пределах пласта высокого сопротивления оно выражается в виде

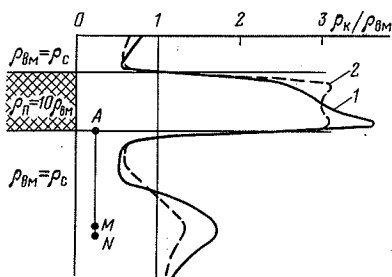


Рис. 29. Кривые КС трех- (1) и четырех-электродного (2) градиент-зондов с $L/h = 1,8$ для одиночного пласта высокого сопротивления (заштрихован) с учетом влияния скважины

небольшого понижения кажущегося сопротивления против центра пласта на фоне максимума. Амплитуда этого понижения уменьшается с увеличением отношения L/h . По обеим сторонам от пласта наблюдаются экранные максимумы и минимумы. Максимумы находятся на расстоянии L от каждой из границ пласта, а минимумы примыкают непосредственно к границам пласта, причем интервал их равен $(L - h)$ (рис. 29). Амплитуда экранных максимумов и минимумов растет с увеличением удельного сопротивления пласта и уменьшается с увеличением размера зонда. Однако, как показывают расчеты, выполненные без учета влияния скважины, снижение амплитуды экранирования с увеличением размера относительно невелико: при увеличении размера трехэлектродного зонда в 4,5 раза амплитуда экранного максимума уменьшается всего на 8,5 %, а у четырехэлектродного — еще меньше.

Экранирующее влияние среды, расположенной за пределами измерительной установки, определяется повышением регистрируемых кажущихся сопротивлений, если экранирующая среда имеет сопротивление большее, чем исследуемые отложения. В противном случае экранирование будет понижающим.

Для оценки амплитуды и интервала экранирования четырехэлектродного зонда одной границей раздела двух сред различного удельного сопротивления рассчитаны кривые без учета влияния скважины методом зеркальных изображений (рис. 30). Как видно из этого рисунка, максимальная амплитуда экранирования наблюдается в случае, когда токовый электрод находится на границе раздела сред. С увеличением или уменьшением сопротивления экранирующей среды по сравнению с ρ_1 амплитуда экранирования нарастает весьма интенсивно и при $\rho_2/\rho_1 = 50 \div 100$ или $0,05 \div 0,01$ экранирование становится почти таким же, как и при ρ_2/ρ_1 , равном ∞ или 0. С удалением питающего электрода от границы раздела сред амплитуда экранирования довольно быстро убывает и при $x/L = 0,47$ кажущееся сопротивление отличается от удельного не более чем на 10 % даже при ρ_2/ρ_1 , равном ∞ или 0.

У трехэлектродных градиент-зондов характер экранирования качественно такой же. Однако амплитуда экранирования у них в

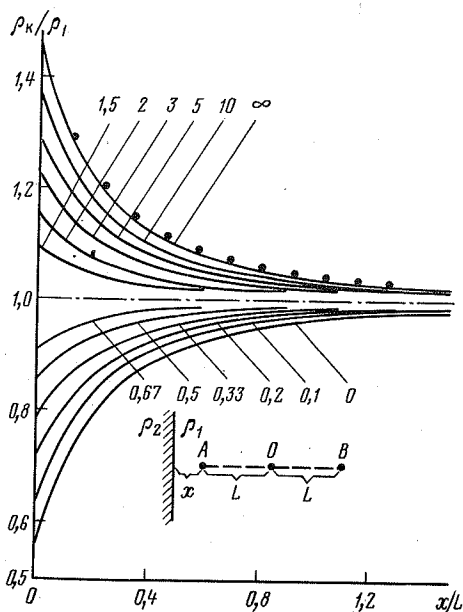


Рис. 30. Экранирование показаний четырехэлектродного градиент-зонда одной границей раздела (без учета влияния скважины).

Шифр кривых — ρ_2/ρ_1

2,27–2,75, а интервал в 2,3 раза больше, чем у четырехэлектродных.

Наиболее неблагоприятным с точки зрения экранирования кривых КС четырехэлектродных зондов является такой сравнительно редкий случай, когда мощные пласты бесконечно высокого или низкого сопротивления располагаются по разные стороны от зонда и непосредственно примыкают к его питающим электродам. Но даже в этом случае при повышающем экранировании кажущееся сопротивление будет преувеличено по сравнению с удельным всего в 1,84 раза.

Когда расстояние между токовыми электродами зонда соизмеримо с мощностью пласта высокого сопротивления, залегающего среди вмещающих пород низкого сопротивления, против его середины наблюдается локальный минимум, обусловленный экранированием токовых линий границами пласта высокого сопротивления, вследствие чего плотность тока в районе точки записи уменьшается. Амплитуда этого минимума тем больше, чем больше разница между удельными сопротивлениями пласта и вмещающих пород.

Таким образом, наличие в разрезе пластов, соизмеримых по мощности с удвоенным размером зонда, несколько ограничивает применение четырехэлектродных градиент-зондов. Однако, учитывая

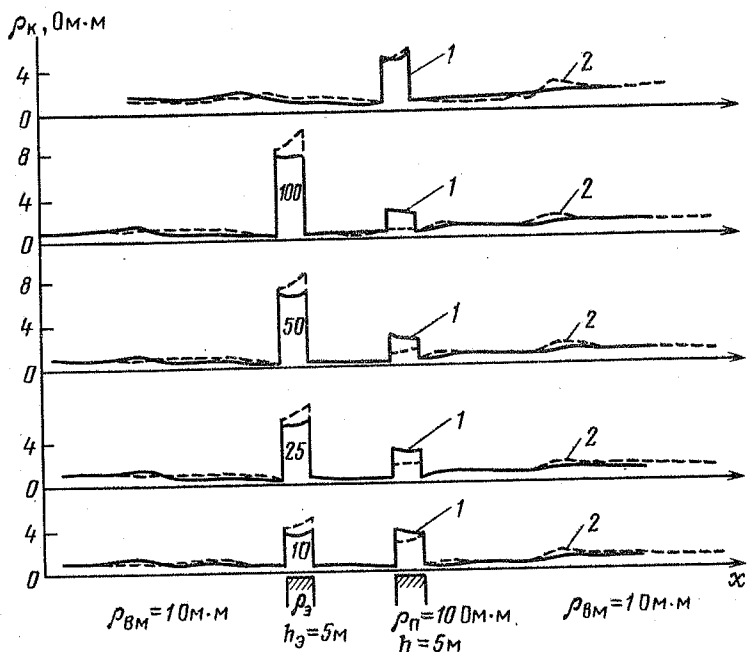


Рис. 31. Теоретические кривые КС для двух пластов высокого сопротивления без учета влияния скважины для четырехэлектродных (1) и трехэлектродных (2) зондов.

$L = 25$ м, $S = 15$ м — расстояние между пластами

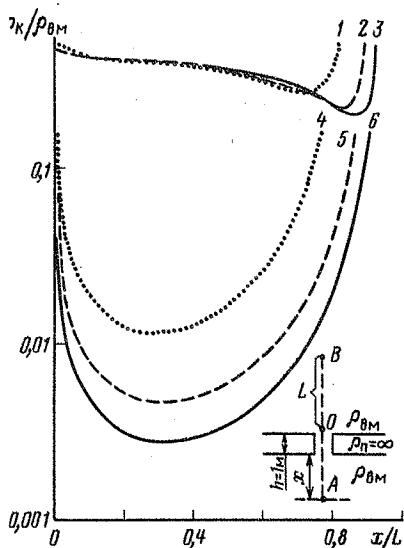
то обстоятельство, что геологический разрез в большинстве случаев обладает довольно резкой изменчивостью по сопротивлению в вертикальном направлении, с указанным ограничением на практике приходится сталкиваться достаточно редко, особенно если используются зонды большого размера.

Экранирующий пласт высокого сопротивления, расположенный между токовым электродом зонда и точкой записи, занижает кажущееся сопротивление экранированного пласта по сравнению с одиночным как у трех-, так и у четырехэлектродного зондов, хотя в последнем случае это занижение значительно меньше (рис. 31).

Наибольшее искажение кажущегося сопротивления, регистрируемого четырехэлектродным градиент-зондом, наблюдается, когда между точкой записи и каждым из токовых электродов располагаются пласты высокого сопротивления. Однако в этом случае сильное ослабляющее влияние на экранирование четырехэлектродных зондов оказывает ствол скважины, заполненной проводящей промысловой жидкостью.

Рис. 32. Кривые КС в зоне экранного минимума (с учетом влияния скважины) градиент-зондов:

четырёхэлектродных — 1, 2, 3 (с L , равными 8, 16, 25 м соответственно); трёхэлектродных — 4, 5, 6 (с L , равными 8, 16, 25 м соответственно)



На рис. 32 приведены участки кривых КС в зоне экранного минимума, регистрируемого трех- и четырехэлектродными градиент-зондами, рассчитанные с учетом влияния скважины для модели разреза, содержащей пласт бесконечно высокого сопротивления. Из рассмотрения этих кривых следует, что амплитуда экранного минимума у четырехэлектродных зондов на 1,5–2 порядка меньше, чем у трехэлектродных. При этом с увеличением трехэлектродного зонда амплитуда экранного минимума не уменьшается, а растет, тогда как у четырехэлектродного она практически не изменяется.

Следует отметить, что в модели, принятой для расчета кривых КС (см. рис. 32), сопротивление вмещающих пород было взято равным сопротивлению промывочной жидкости. Совершенно очевидно, что при обычно встречающемся на практике случае, когда $\rho_{BM} > \rho_c$, экранирование будет сказываться существенно меньше, чем при $\rho_{BM} = \rho_c$, что и наблюдается на кривых КС четырехэлектродных градиент-зондов, зарегистрированных в скважинах.

В том случае, когда экранирующий пласт высокого сопротивления находится за пределами измерительной установки, ствол скважины практически не влияет на степень экранирования регистрируемой кривой КС (точки на рис. 30).

Таким образом:

увеличение размеров градиент-зонда и использование в нем двух питающих электродов приводит к снижению влияния экранирования неоднородности разреза, причем второе оказывается с этой точки зрения значительно более эффективным;

скважина, заполненная проводящей промывочной жидкостью, сильно ослабляет эффекты экранирования кривой КС четырехэлектродных градиент-зондов пластами высокого сопротивления, расположенными в пределах измерительной установки, практически не сказываясь в то же время на экранировании такими же пластами, находящимися вне пределов установки.

В целом же, учитывая частичную взаимную компенсацию понижающего и повышающего экранирования пластами высокого сопротивления ограниченной ($h < L$) мощности, расположенными в пределах установки и за ее границами, можно считать, что в большинстве случаев кривая КС, регистрируемая четырехэлектродными градиент-зондами большого размера, искажена влиянием экранирования существенно меньше, чем у трехэлектродных зондов.

§ 4. АНИЗОТРОПИЯ РАЗРЕЗА

При исследовании скважин установками большого размера обычно приходится иметь дело с произвольным переслаиванием пластов разной мощности и сопротивления, обуславливающим макроанизотропию разреза. В практике электротметрии скважин обычно имеют дело с двухкомпонентной анизотропией, когда проводимость породы в любом направлении по напластованию не меняется. Именно этот вид анизотропии и будет подразумеваться в последующем.

Свойства макроанизотропной среды, состоящей из пачки однородных изотропных пластов разного сопротивления, определяются известными соотношениями:

$$\rho_n = \frac{\sum_{i=1}^m T_i}{\sum_{i=1}^m h_i} = \frac{\sum_{i=1}^m h_i \rho_i}{\sum_{i=1}^m h_i}; \quad (45)$$

$$\rho_t = \frac{\sum_{i=1}^m h_i}{\sum_{i=1}^m S_i} = \frac{\sum_{i=1}^m h_i}{\sum_{i=1}^m (h_i/\rho_i)}; \quad (46)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m h_i \rho_i}{\sum_{i=1}^m h_i} \frac{\sum_{i=1}^m (h_i/\rho_i)}{\sum_{i=1}^m h_i}}; \quad (47)$$

$$\rho_m = \sqrt{\rho_n \rho_t} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m h_i \rho_i}{\sum_{i=1}^m h_i} \frac{\sum_{i=1}^m (h_i/\rho_i)}{\sum_{i=1}^m h_i}} = \rho_n / \lambda = \lambda \rho_t, \quad (48)$$

где ρ_t , ρ_n и ρ_m — соответственно средние продольное, поперечное и квадратичное удельные сопротивления анизотропной толщи; λ —

коэффициент анизотропии; T и S – соответственно суммарные поперечное сопротивление и продольная проводимость анизотропной толщи; ρ_i и h_i – соответственно удельные электрические сопротивления и мощности слоев, слагающих толщину.

Наибольший интерес при электротометрии имеет общая анизотропия исследуемого разреза, которая включает как микро-, так и макроанизотропию толщи пород, вскрытых скважиной. Коэффициент анизотропии такой среды может быть определен с помощью выражения

$$\lambda_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^m h_i} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m h_i \lambda_{\mu i} \rho_{m i}}{\sum_{i=1}^m \frac{\lambda_{\mu i} h_i}{\rho_{m i}}}}, \quad (49)$$

где $\lambda_{\mu i} = \sqrt{\rho_n i / \rho_t i} = \rho_n i / \rho_{m i} = \rho_{m i} / \rho_t i$ – коэффициент микроанизотропии каждого из слоев разреза, а $\rho_t i$, $\rho_n i$ и $\rho_{m i}$ – соответственно их средние продольное, поперечное и квадратичное удельные сопротивления.

Из теории электротометрии известно [15], что в однородной анизотропной среде (при работе установок, перпендикулярных к напластованию пород)

$$\rho_{K_n} = \rho_m / \lambda = \rho_t = \rho_n / \lambda^2, \quad (50)$$

а при измерении вдоль напластования

$$\rho_{K_t} = \rho_m = \sqrt{\rho_n \rho_t} = \lambda \rho_{K_n} = \lambda \rho_t. \quad (51)$$

Так как λ всегда больше единицы, то ρ_{K_t} , измеренное вкост напластования пород, всегда меньше измеренного по напластованию. В то же время истинное удельное сопротивление вкост напластования всегда больше, чем по напластованию. Указанное явление общеизвестно и носит наименование парадокса анизотропии.

Из формулы (50) также следует, что кажущееся сопротивление, измеренное вкост напластования, равно истинному продольному удельному электрическому сопротивлению. Это справедливо для неограниченной однородной анизотропной среды, а также в том случае, когда линейные размеры применяемой измерительной установки меньше мощности однородного анизотропного пласта. В тех же случаях, когда размеры зонда превышают мощность однородного анизотропного пласта, поперечное кажущееся сопротивление, измеряемое ею, может существенно отличаться от истинного продольного сопротивления пласта как в большую, так и в меньшую стороны в зависимости от величины общего коэффициента анизотропии среды, заключенной между токовыми электродами зонда.

Рассмотрим доказательство этого утверждения.

Согласно закону Ома в дифференциальной форме

$$\rho = E/j, \quad (52)$$

где ρ , j и E — соответственно истинное удельное сопротивление, плотность тока и напряженность электрического поля, измеренная в направлении вектора плотности тока.

Так как плотность тока практически измерить невозможно, то в неоднородных средах вместо удельного определяется кажущееся сопротивление

$$\rho_k = E/j_0, \quad (53)$$

где j_0 — плотность тока, которая должна была бы иметь место в точке наблюдения в однородной изотропной среде при заданных силе тока и расположении электродов питающей цепи относительно точки наблюдения. Величина j_0 может быть легко рассчитана теоретическим путем.

Из формул (52) и (53)

$$\rho_k = \rho (j/j_0). \quad (54)$$

Таким образом, фактически измеряемое ρ_k может быть как больше, так и меньше истинного удельного сопротивления в зависимости от отношения j/j_0 .

Если наблюдения проводятся в неограниченной анизотропной среде с помощью установки, ориентированной вдоль напластования, то определяемое продольное кажущееся сопротивление

$$\rho_{k_t} = E_t/j_0 = \rho_t (j_t/j_0), \quad (55)$$

где E_t , j_t и ρ_t — продольные составляющие напряженности электрического поля, плотности тока и истинное продольное удельное электрическое сопротивление соответственно.

При ориентировке установки в направлении, перпендикулярном к напластованию, измеряется поперечное кажущееся сопротивление

$$\rho_{k_n} = E_n/j_0 = \rho_n (j_n/j_0), \quad (56)$$

где E_n , j_n и ρ_n — поперечные составляющие напряженности электрического поля, плотности тока и истинное поперечное удельное электрическое сопротивление соответственно.

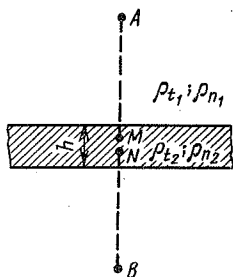
Из сопоставления формул (55), (56) и (50), (51)

$$j_t/j_0 = \lambda; \quad (57)$$

$$j_n/j_0 = 1/\lambda^2. \quad (58)$$

Из выражений (57) и (58) следует, что в однородной анизотропной среде при одинаковых параметрах измерительной установки плотность тока j_t в направлении напластования в λ раз больше, а в поперечном направлении j_n в λ^2 раз меньше, чем плотность тока j_0 в однородной изотропной среде.

Рис. 33. Модель однородного анизотропного пласта, залегающего в однородной анизотропной среде неограниченной мощности (без учета влияния скважины)



Допустим теперь, что среда состоит из трех плоскопараллельных однородных анизотропных слоев, причем верхний и нижний имеют неограниченную мощность, а центральный характеризуется конечной мощностью h_2 (рис. 33). Истинные продольное и поперечное удельные сопротивления центрального пласта соответственно равны ρ_{t2} и ρ_{n2} , а аналогичные сопротивления верхнего и нижнего слоев — ρ_{t1} и ρ_{n1} .

Если наблюдения производить с помощью четырехэлектродной установки AMNB, ориентированной перпендикулярно к напластованию, то будет измеряться кажущееся поперечное сопротивление этой неоднородности среды [согласно формуле (50)]

$$\rho_{kn_i} = \rho_{ni} / \lambda_{oi}^2, \quad (59)$$

где ρ_{ni} — истинное поперечное удельное сопротивление среды в точке наблюдения; λ_{oi} — общий коэффициент анизотропии среды, заключенной между питающими электродами, при наблюдении в точке i .

Совершенно очевидно, что величина ρ_{ni} в зависимости от положения установки относительно принятого разреза может принимать при $MN \rightarrow 0$ только два значения: ρ_{n1} или ρ_{n2} , тогда как величина λ_{oi} — самые разные значения. Действительно, если установка расположена достаточно далеко от границ центрального слоя, т.е. находится в пределах верхнего или нижнего однородных анизотропных слоев, то общий коэффициент анизотропии λ_{oi} соответствует коэффициенту микроанизотропии этих слоев $\lambda_{i1} = \sqrt{\rho_{n1} / \rho_{t1}}$. Следовательно, в этом случае получим $\rho_{kn_i} = \rho_{n1} / \lambda_{i1}^2 = \rho_{t1}$.

Если измерительную установку расположить симметрично относительно центра среднего пласта (см. рис. 33), то общий коэффициент анизотропии можно вычислить по формуле (49):

$$\lambda_o = \frac{\sqrt{\Sigma T \Sigma S}}{\Sigma h} = \frac{\sqrt{(h_1 \rho_{n1} + h_2 \rho_{n2}) (h_1 / \rho_{t1} + h_2 / \rho_{t2})}}{h_1 + h_2}, \quad (60)$$

где h_1 — мощность вмещающих пород, заключенная между питающими электродами.

Так как $h_1 = AB - h_2$, а $h_1 + h_2 = AB$, то формулу (60) можно представить как

$$\lambda_0 = \frac{\sqrt{[(AB/h_2 - 1) \rho_{n_1} + \rho_{n_2}] [(AB/h_2 - 1) (1/\rho_{t_1}) + 1/\rho_{t_2}]}}{AB/h_2}. \quad (61)$$

Тогда кажущееся поперечное сопротивление центрального слоя

$$\rho_{Kn_2} = \rho_{n_2} / \lambda_0^2 = \frac{(AB/h_2)^2 \rho_{n_2}}{[(AB/h_2 - 1) \rho_{n_1} + \rho_{n_2}] [(AB/h_2 - 1) (1/\rho_{t_1}) + 1/\rho_{t_2}]}. \quad (62)$$

Следует иметь в виду, что формулы (59) и (62) являются приближенными, так как основаны на предположении, что распределение плотности тока, как и в случае однородной анизотропной среды, определяется тождеством (58). Между тем фактическое распределение плотности тока зависит не только от геоэлектрического разреза, заключенного между питающими электродами, для которого и вычисляется общий коэффициент анизотропии λ_0 , но и от параметров толщи, лежащей за пределами измерительной установки. Однако в связи с тем, что учет влияния этой толщи сопряжен с большими трудностями, в дальнейшем будем пользоваться приближенной формулой (62). Отметим, что указанная формула имеет физический смысл только при $AB/h_2 \gg 1$.

Представляет большой практический интерес выяснение зависимости λ_0 и ρ_{Kn_2} от размеров зонда AB/h при симметричном его расположении относительно середины центрального слоя.

Если принять $AB/h_2 = 1$, то, пользуясь формулами (61) и (62), получим

$$\lambda_0 = \sqrt{\rho_{n_2} / \rho_{t_2}}; \rho_{Kn_2} = \rho_{n_2} / \lambda_0^2 = \rho_{t_2}.$$

Если $AB/h_2 > 1$, то $\lambda_1 \leq \lambda_0 \leq \lambda_2$, а $(\rho_{t_1} / \rho_{n_1}) \rho_{t_2} \leq \rho_{Kn_2} \leq \rho_{t_2}$ в зависимости от величины λ_2 / λ_1 . Так, например, при $\lambda_1 < \lambda_2$ получим $(\rho_{t_1} / \rho_{n_1}) \rho_{n_2} > \rho_{Kn_2} > \rho_{t_2}$, а при $\lambda_1 > \lambda_2 - (\rho_{t_1} / \rho_{n_1}) \rho_{n_2} < \rho_{Kn_2} < \rho_{t_2}$. И наконец, если $AB/h_2 \rightarrow \infty$, то $\lambda_0 \rightarrow \lambda_1$ и $\rho_{Kn_2} \rightarrow (\rho_{t_1} / \rho_{n_1}) \rho_{n_2}$.

Таким образом, при электротометрии скважин установками, размеры которых равны или меньше мощности слоя, кажущееся поперечное сопротивление этого слоя действительно равно его продольному удельному электрическому сопротивлению. Однако, когда применяются зонды с очень большими по сравнению с мощностью слоя размерами, измеряемое кажущееся поперечное сопротивление этого слоя может резко отличаться от его истинного продольного сопротивления как в большую, так и в меньшую сторону. В тех случаях, когда общий коэффициент анизотропии толщи, расположенной в пределах большой установки, близок к единице, измеряемое кажу-

Таблица 7

L	ρ_{Π}	$\rho_{\kappa \lambda}$	$\rho_{\kappa \text{ЭВМ}}$	$(\rho_{\kappa \lambda} - \rho_{\kappa \text{ЭВМ}}) / \rho_{\kappa \text{ЭВМ}}$
м		Ом·м		%
8	10	3,65	2,9	25,9
16	"	4,83	3,9	23,85
25	"	5,76	4,6	25,6
8	100	4,53	4,0	13,25
16	"	7,18	6,4	12,19
25	"	10,18	8,9	14,38
8	1000	4,64	4,3	7,91
16	"	7,54	7,3	3,29
25	"	11,01	10,6	3,87

щеся поперечное сопротивление анизотропного слоя равняется не продольному, а истинному поперечному удельному электрическому сопротивлению.

Для оценки величины погрешностей, связанных с приближенным характером приведенных формул, в табл. 7 дано сопоставление кажущихся сопротивлений, вычисленных с их помощью ($\rho_{\kappa \lambda}$) и на ЭВМ ($\rho_{\kappa \text{ЭВМ}}$) для точек, расположенных в центре одиночных однородных изотропных пластов одинаковой мощности h , равной 5 м, и различного

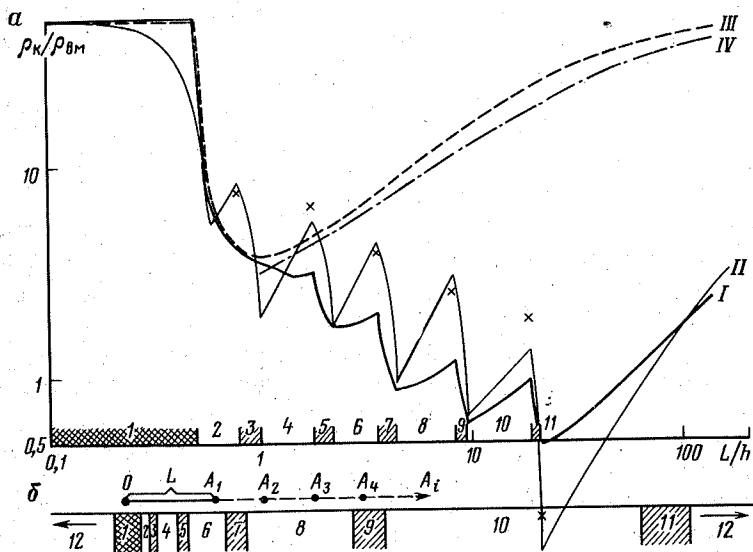


Рис. 34. Кривые зондирования для анизотропного разреза (I и II) и одиночного пласта (III и IV)

сопротивления, залегающих в однородной вмещающей среде с $\rho_{\text{ВМ}} = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Ошибки в определении $\rho_{\text{К}}$ с помощью λ по сравнению с $\rho_{\text{К}}$, вычисленными по точным формулам на ЭВМ, относительно невелики. Следовательно, если известны геометрические и электрические параметры всех пластов, слагающих разрез, по формулам (47), (49) и (59) можно определять приближенные значения кажущегося сопротивления для зондов, превышающих своими размерами мощности пластов, т.е. сравнительно легко решать прямую задачу электротометрии для макроанизотропного разреза без учета влияния скважины. При этом общий коэффициент анизотропии должен вычисляться с помощью формулы (47) или (49) путем почленного суммирования мощностей, поперечных сопротивлений и продольных проводимостей всех пластов, расположенных в пределах измерительной установки.

На рис. 34, а приведены кривые зондирования, рассчитанные применительно к трехэлектродному зонду с помощью λ и на ЭВМ для пласта, залегающего в анизотропном разрезе (см. рис. 34, б) и такого же, но однородного изотропного пласта. Приведем параметры анизотропного разреза:

Номер пласта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\rho_{\text{П}}$, Ом·м	50	1	100	1	200	1	400	1	600	1	1000	1
h , м	5	1,5	1	4	2	7	4	20	6	48	9	∞

По поведению кривой зондирования I для анизотропного разреза, вычисленной с помощью λ (см. рис. 34), можно сделать заключение, что при увеличении размера зонда, по мере того, как в его пределы попадает все большее количество пластов высокого сопротивления, измеряемое им кажущееся сопротивление систематически уменьшается, что связано с увеличением коэффициента анизотропии толщи пород, охватываемой зондом. При этом на кривой наблюдаются резкие изломы, соответствующие расположению токового электрода зонда у границ раздела пластов различного удельного сопротивления.

Кривая зондирования II , вычисленная для той же модели на ЭВМ; в целом подчиняется тем же закономерностям. При этом характерно, что когда токовый электрод зонда расположен сразу же за очередным пластом высокого сопротивления, т.е. когда этот пласт уже входит в пределы измерительной установки, а следующий находится от нее еще на значительном расстоянии, численные значения кажущегося сопротивления, вычисленные с помощью λ и на ЭВМ, весьма близки между собой. В то же время при расположении питающего электрода непосредственно перед очередным пластом высокого сопротивления расхождения между $\rho_{\text{К}} \lambda$ и $\rho_{\text{К}}$ ЭВМ весьма значительные. Объясняется это неучтенным влиянием на величину коэффициента анизотропии пород, расположенных за пределами измерительной установки.

Исходя из того, что значения ρ_k ЭВМ при расположении токового электрода зонда перед очередным пластом высокого сопротивления всегда больше $\rho_k \lambda$, можно сделать вывод о том, что наличие пластов высокого сопротивления за пределами измерительной установки увеличивает коэффициент анизотропии.

Ранее было показано (см. рис. 30), что экранирование пластинами высокого сопротивления, расположенными за пределами установки, начиная с $\rho_3 = 50 \div 100$ Ом·м, практически такое же, как и у пласта с $\rho_3 = \infty$. В результате этого токовые линии поля, создаваемого питающими электродами, не смогут распространяться за пределы экранирующих пластов; они будут „отжиматься” в область среды, расположенную между токовыми электродами. При этом основное экранирующее влияние будет оказывать, очевидно, первый пласт высокого сопротивления, находящийся за пределами измерительной установки. Хотя за счет анизотропии разреза нормальная составляющая плотности тока j_n в районе точки записи и понижается в $1/\lambda^2$ раз по сравнению с однородной изотропной средой, наличие за пределами установки экранирующих пластов высокого сопротивления повышает ее, в какой-то мере компенсируя это понижение, и тем самым приводит к уменьшению коэффициента анизотропии, поскольку $1/\lambda^2 = j_n/j_0$, где j_0 — величина плотности тока в однородной изотропной среде. В результате этого кажущееся сопротивление будет возрастать.

Таким образом, учесть влияние среды, расположенной за пределами измерительной установки, при определении $\rho_k \lambda$ можно путем учета экранирования с помощью зависимостей, приведенных на рис. 30.

На рис. 34 крестиками показаны значения $\rho_k \lambda$, вычисленные для анизотропного разреза с учетом экранирования указанным выше способом. Они значительно лучше совпадают с кажущимися сопротивлениями, полученными на ЭВМ, чем в том случае, когда влияние экранирования не учитывается.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что конфигурация кривой зондирования пласта, залегающего в многослойной среде, в общем случае определяется его удельным сопротивлением и характером изменения коэффициента анизотропии толщи пород, охватываемых измерительной установкой.

Сравнение кривых зондирования для пласта, залегающего в анизотропном разрезе, и для одиночного пласта (кривая III, вычисленная с помощью ЭВМ, и кривая IV, снятая с палетки ТП-2) показывает резкое различие их формы, что говорит о возможности применения палеточных способов количественной интерпретации кривых зондирования, полученных зондами, размерами превышающими мощность пласта, лишь для одиночных пластов, залегающих в однородной вмещающей среде. В случае неоднородного разреза, сложенного

переслаиванием пластов разного удельного сопротивления, для интерпретации необходимо использовать методики, позволяющие учитывать влияние на регистрируемые ρ_k параметров всех слоев разреза, охватываемого измерительной установкой, а также находящихся на некотором расстоянии за ее пределами.

Глава IV

ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для подтверждения теоретических предпосылок, лежащих в основе того или иного метода промысловой геофизики, а также выяснения его возможностей и ограничений в случаях, не поддающихся аналитическим расчетам, широкое применение получило физическое и математическое моделирование, позволяющее, в отличие от измерений в скважинах, в чистом виде проследить влияние на регистрируемую величину различных параметров разреза и скважины.

Аналитический расчет кажущегося сопротивления, получаемого четырехэлектродными градиент-зондами большого размера в слоистой среде, затруднен в связи с учетом большого числа факторов, влияющих на измерения. Поэтому выяснение зависимости кривых КС, регистрируемых четырехэлектродными градиент-зондами, от различных параметров разреза и скважины осуществлялось, главным образом, путем электролитического, сеточного и математического моделирования.

Конкретные задачи моделирования следующие.

1. Определение глубинности исследования четырехэлектродных градиент-зондов большого размера в пластах ограниченной мощности.
2. Изучение способности зондов выделять пласты на фоне вмещающих пород.
3. Уточнение конфигурации кривых КС против пластов разной мощности и сопротивления.
4. Определение степени влияния экранирования и скважины на показания зондов.

§ 1. ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Электролитическое моделирование проводилось в ванне, заполненной подсолонной водой. Использовались модели трех типов.

Модель первого типа представляет собой плексигласовые пластины толщиной 8–10 мм с размерами, равными поперечному сечению

ванны. Для получения заданных поперечных сопротивлений в пластинах были высверлены отверстия, расположенные по полуокружностям с центром в середине верхней кромки пластин. Густота и диаметр отверстий подбирались таким образом, чтобы во всех частях модели пласта на единицу его площади приходилась строго одинаковая площадь поперечного сечения отверстий. При этом ближе к центру полуокружностей отверстия сверлились меньшим диаметром, но по более густой сетке. По мере удаления от центра диаметр отверстий увеличивался, а густота их соответственно уменьшалась. В центре полуокружностей было высверлено отверстие, служащее аналогом ствола скважины. Поэтому выбранная система перфорации обеспечивала наиболее равномерное распределение электрического поля в „прискважинной” части модели при резком сокращении общего числа отверстий.

Теоретическое значение истинного поперечного удельного сопротивления перфорированных пластин

$$\rho_{n2} = 4 S \rho_1 / \pi d^2, \quad (63)$$

где S – поверхность пластины, на которую приходится одно отверстие; d – диаметр отверстия и ρ_1 – удельное электрическое сопротивление воды, заполняющей ванну.

Поскольку в гл. III § 4 было доказано, что при использовании очень больших по сравнению с мощностью исследуемого пласта измерительных установок регистрируемое кажущееся сопротивление его становится практически равным истинному поперечному удельному сопротивлению, то модель описанного типа может быть использована в качестве пластов любого заданного высокого сопротивления при моделировании кривых КС установками, размеры которых во много раз превышают мощность пласта.

Так как для использовавшихся пластин $S = 100 \text{ мм}^2$, а $d = 0,8 \text{ мм}$, то согласно (63) $\rho_{n2} = 198 \rho_1$. Продольное удельное сопротивление ρ_{t2} этих моделей было бесконечно велико, а коэффициент их „микрoанизотропии” равнялся нулю, поскольку

$$\lambda_2 = \sqrt{\rho_{n2} / \rho_{t2}} = 0.$$

В качестве вмещающей модели пластов среды использовалась вода с $\rho_{n1} = \rho_{t1} = \rho_1$. Поэтому, в том случае, когда использовался только один пласт, согласно формулам (61) и (62) общий коэффициент анизотропии среды, заключенной между питающими электродами симметричной четырехэлектродной установки и кажущееся поперечное сопротивление перфорированной пластины определялись соответственно выражениями:

$$\lambda_0 = \frac{\sqrt{[(AB/h - 1) \rho_1 + 198 \rho_1] (AB/h - 1) (1/\rho_1)}}{AB/h} = \frac{\sqrt{(AB/h + 197) (AB/h - 1)}}{AB/h} \quad (64)$$

$$\rho_{кп2} = \frac{\rho_{п2}}{\lambda_0^2} = \frac{198 (AB/h)^2}{(AB/h + 197) (AB/h - 1)} \rho_1, \quad (65)$$

где h — мощность перфорированной пластины.

Ниже приведены значения λ_0 и $\rho_{кп2}/\rho_1$ для различных AB/h , вычисленные по формулам (64) и (65):

AB/h	....	1	1,5	2	2,5	3	5	10	20	50	100	∞
λ_0	.....	0	6,64	7,06	6,82	6,67	5,67	4,31	3,21	2,2	1,72	1
$\rho_{кп2}/\rho_1$	∞	4,50	3,98	4,13	4,48	6,18	10,6	19,2	40,9	66,8	198

При $AB/h = 2$ общий коэффициент анизотропии становится максимальным, а $\rho_{кп2}/\rho_1$ — минимальным. При $AB/h \rightarrow \infty$ $\lambda_0 \rightarrow 1$, а кажущееся поперечное сопротивление пласта действительно становится равным его истинному поперечному удельному сопротивлению.

В результате количественной интерпретации экспериментальной кривой КС, полученной над одиночной перфорированной пластиной в электрическом поле, эквивалентном полю бесконечно большой установки, величина $\rho_{кп2}$ оказалась равной $214 \rho_1$, т.е. совпадающей с истинным поперечным удельным электрическим сопротивлением $\rho_{п2}$, равным $198 \rho_1$, с точностью 8%.

Таким образом, с одной стороны, это подтверждает сделанный ранее вывод о том, что в тех случаях, когда размеры измерительной установки во много раз превышают мощность однородного анизотропного пласта, измеряемое ею поперечное кажущееся сопротивление практически становится равным истинному поперечному удельному сопротивлению пласта, а с другой — позволяет при моделировании кривых КС в электрометрической ванне большими установками в качестве высокоомных пластов любого заданного сопротивления (ρ) использовать перфорированные пластины изолятора с $\rho_n = \rho$ и $\rho_t = \infty$.

При уменьшении размеров зонда регистрируемое им кажущееся сопротивление уже не будет равняться истинному поперечному удельному сопротивлению и рассчитать его с достаточной степенью точности не представляется возможным. Поэтому для прослеживания изменений амплитуды и конфигурации кривых КС при конечных размерах установок использовались модели второго типа, которые представляют собой пластины заданной толщины, отлитые из цементного раствора. Для изменения удельного электрического сопротивления моделей к цементу в различных пропорциях добавлялся графитовый порошок.

Модели третьего типа, предназначенные для изучения характера кривых КС в пластах при наличии зоны проникновения, представляли собой набор полуколец, отлитых из цемента с добавлением различного количества графитового порошка. Вставляя или вынимая из электрометрической ванны то или иное количество полуколец, можно было

моделировать зону проникновения разного диаметра с удельным сопротивлением, равным сопротивлению вмещающей среды, т.е. воды, заполняющей ванну. Путем комбинации цементных полуколоц с добавлением различного количества графитового порошка можно было также получать модели зон проникновения с удельными сопротивлениями, отличными от сопротивления вмещающей среды.

Для исключения влияния ограниченных размеров электролитической ванны при обработке кривых КС и построении результативных графиков использовалось отношение ρ_K , считанного в любой точке записанной кривой, к кажущемуся сопротивлению, зарегистрированному в однородной вмещающей среде в удалении от моделей. Так как обе эти величины искажены ограниченными размерами ванны примерно в одинаковой степени, то при использовании их отношения влияние ограниченных размеров ванны практически исключается.

Рассматривая результаты моделирования, прежде всего остановимся на графиках $\rho_K / \rho_{ВМ}$, полученных над одиночным непроницаемым пластом высокого сопротивления (рис. 35), который на кривых ρ_K , записанных всеми зондами (трех- и четырехэлектродными), отмечается в виде четкого максимума. При этом с увеличением размера зонда относительное сопротивление в максимуме $\rho_{K \max} / \rho_{ВМ}$ закономерно возрастает. Так, на кривой, записанной самым маленьким трехэлектродным зондом, $\rho_{K \max} / \rho_{ВМ} = 1,4$, а на кривой самого большого зонда $\rho_{K \max} / \rho_{ВМ} = 43$. Аналогичная картина наблюдается и на кривых ρ_K , записанных четырехэлектродными зондами: величины $\rho_{K \max} / \rho_{ВМ}$, вычисленные для самого маленького и самого большого зондов, равны соответственно 1,55 и 70. В однородном электрическом поле $\rho_{K \max} / \rho_{ВМ}$ достигает 162.

Далее, на кривой ρ_K трехэлектродного зонда, размер которого примерно в 5 раз превышает мощность пласта, вне пласта со стороны парных электродов на расстоянии длины зонда от него появляется экраный максимум, а между ним и пластом — экраный минимум. С дальнейшим увеличением размера зонда относительная амплитуда экраных эффектов уменьшается и при достаточно большом по сравнению с мощностью пласта расстоянии АО они практически исчезают. Аналогичная картина наблюдается и на кривых, записанных четырехэлектродными зондами. Только экраные эффекты в этом случае наблюдаются по обе стороны от пласта и становятся меньше по амплитуде.

Таким образом, качественное сравнение кривых, записанных зондами разных типов и размеров, позволяет сделать следующие выводы.

1. Дифференциация кривых ρ_K над одиночным пластом высокого сопротивления возрастает с увеличением размера зонда. При этом на кривых КС четырехэлектродных зондов она выше, чем на кривых такого же размера трехэлектродных зондов.

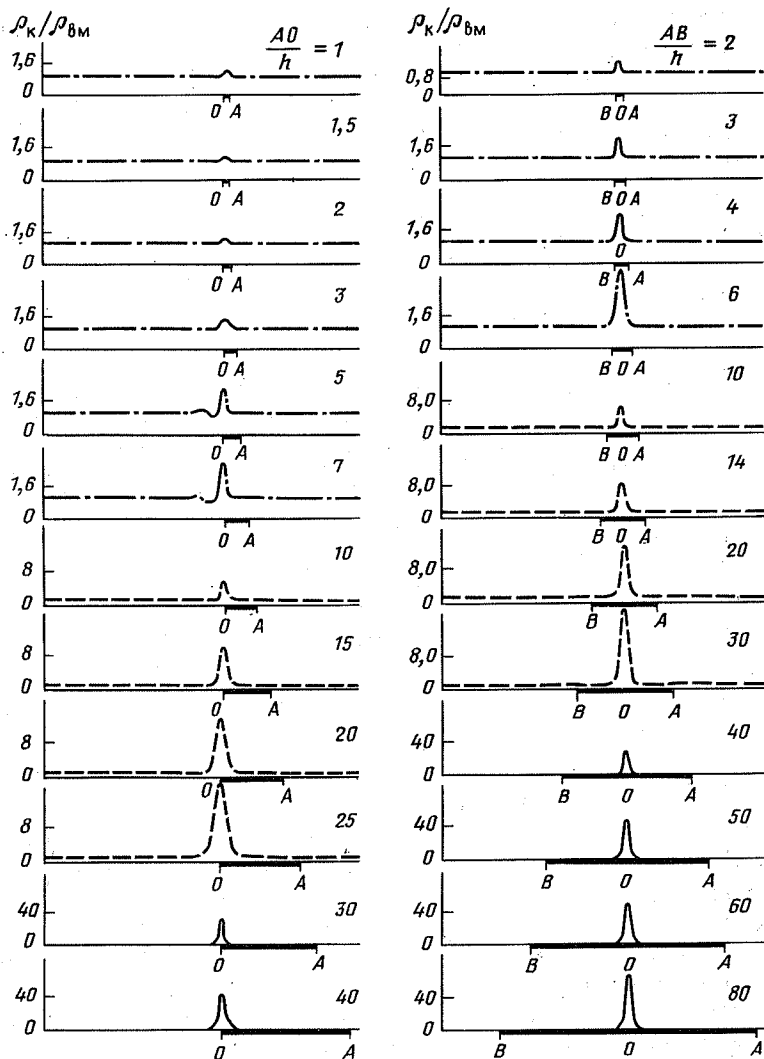


Рис. 35. Экспериментальные кривые над пластом высокого сопротивления: $\rho_{\text{п}}/\rho_{\text{вм}} = 200$; $h = 1$ см; $d = 1$ см (диаметр „скважины“)

2. Экранные эффекты, наблюдаемые по одну или обе (в зависимости от типа зонда) стороны от высокоомного пласта, с увеличением размера зонда уменьшаются по амплитуде и при достаточно больших AO и $AB/2$ практически исчезают. При этом экранные эффекты, наблюдаемые на кривых КС, записанных четырехэлектродными зондами, по

амплитуде меньше, чем на кривых, регистрируемых трехэлектродными зондами.

Рассмотрим пачки тонких пластов высокого сопротивления, разделенных проводящими пропластками. Но прежде введем некоторые определения.

Условимся понимать под дифференциацией пачки отношение среднего арифметического значения $\rho_k \max$ против всех пластов высокого сопротивления, слагающих пачку, к $\rho_{\text{ВМ}}$. Под дифференциацией пластов в пачке будем понимать отношение $(\rho_k \max - \rho_k \min)/\rho_{\text{ВМ}}$, а под экранированием пачки пластов — отношение $(\rho_k \max - \rho_{\text{ВМ}})$ против пласта высокого сопротивления с наибольшей амплитудой кривой ρ_k к $(\rho_k \max - \rho_{\text{ВМ}})$ против такого же пласта, имеющего минимальную амплитуду.

Рассмотрим для примера пачку общей мощностью H , состоящую из 5 пластов высокого сопротивления. Мощности h каждого пласта, входящего в пачку, и разделяющих их проводящих пропластков h' равны между собой. Сопротивления вмещающей среды, „промысловочной жидкости” и пропластков имеют одно и то же значение (рис. 36).

При анализе кривых ρ_k , зарегистрированных зондами разного типа и размера над взятой для примера пачкой пластов прежде всего обращает на себя внимание тот факт, что если рассматривать пачку пластов как единое целое по отношению к вмещающей среде, то для нее будут справедливы те же закономерности, которые были отмечены для одиночного пласта высокого сопротивления. Наряду с этим на кривых ρ_k , записанных над пачкой пластов высокого сопротивления, имеется еще ряд особенностей.

Кривые ρ_k , зарегистрированные трехэлектродными зондами, характеризуются четко выраженной асимметрией. При $AO/H < 1$ амплитуда кривой ρ_k против разных пластов пачки нарастает от удаленного токового электрода к измерительным, а при $AO/H > 1$ — наоборот, от сближенных измерительных электродов к токовому, причем с увеличением размера зонда по сравнению с мощностью пачки асимметрия уменьшается.

В случае четырехэлектродных зондов любого размера кривая ρ_k симметрична относительно середины пачки. При этом характерно, что огибающая, построенная по значениям $\rho_k \max$ против слагающих пачку пластов высокого сопротивления, в случае, когда размер зонда $(AB/2)$ существенно меньше половины мощности пачки, направлена выпуклостью вверх. При увеличении размера зонда огибающая расположена выпуклостью уже не вверх, а вниз, причем максимальной амплитуды этот прогиб достигает при размере зонда, соизмеримом с половиной мощности пачки, а затем уменьшается с увеличением длины зонда.

При анализе дифференциации пластов высокого сопротивления в пачке можно отметить, что дифференциация кривых, записанных

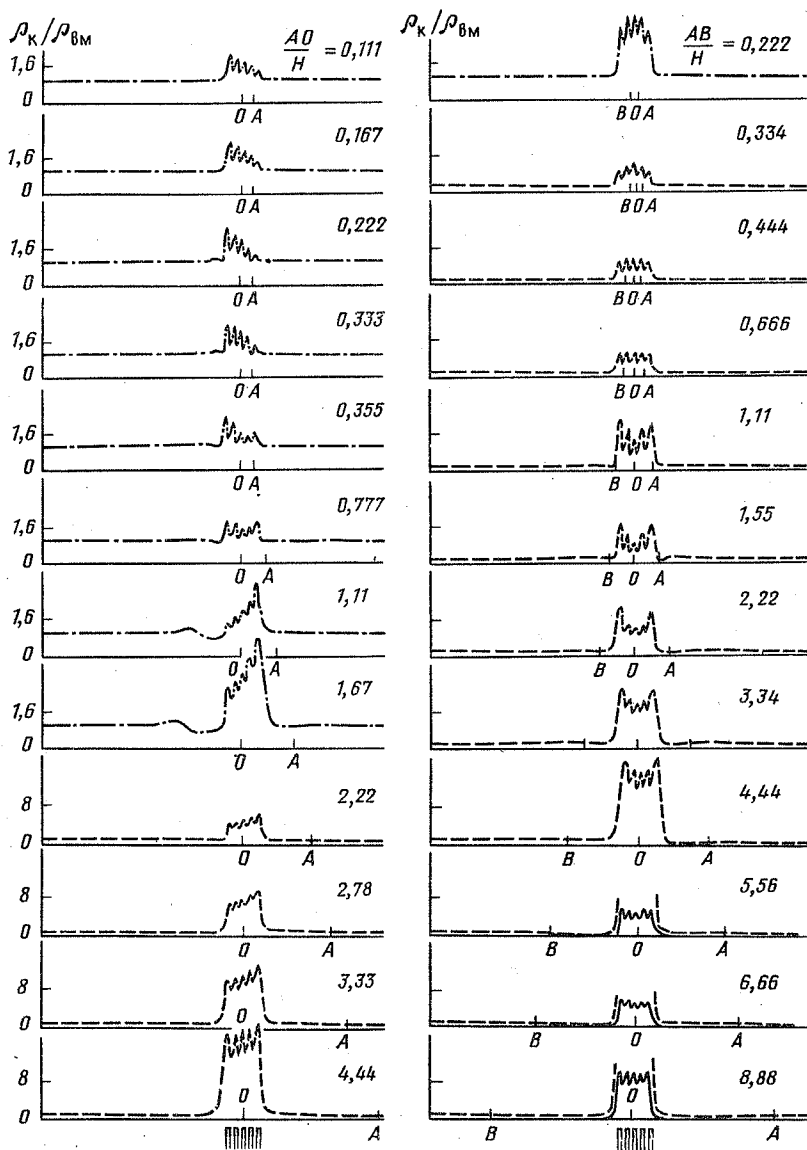


Рис. 36. Экспериментальные кривые над пачкой пластов высокого сопротивления: $\rho_{\text{п}}/\rho_{\text{вм}} = 200$; $H = 9$ см; $h = 1$ см; $d = 1$ см; $h' = 1$ см

четырёхэлектродными зондами, выше, чем кривых, зарегистрированных соответствующими по размеру трёхэлектродными зондами. При этом с увеличением размера зонда и мощности проводящих пропластков, разделяющих пласти высоко сопротивления, дифференциация

также увеличивается. В этом случае степень дифференциации каждого пласта в пачке приближается к степени дифференциации всей пачки в целом, т.е. каждый пласт высокого сопротивления пачки выделяется на кривых ρ_K так же отчетливо, как и вся пачка.

В качестве примера можно привести следующие данные: дифференциация кривых КС над моделью пачки (состоящей из пяти пластов при мощности проводящих прослоев 1 см), записанных зондами малого размера, лишь немногим превышает единицу. Для кривой же КС, зарегистрированной в однородном электрическом поле, она составляет 52. При мощности проводящих прослоев 3 см максимальная дифференциация в однородном поле равна 118, а при увеличении их мощности до 5 см дифференциация увеличивается всего до 121. Таким образом, уже при мощности каждого из прослоев, в 3 раза превышающей мощность пластов высокого сопротивления, дифференциация почти достигает своего предела и при дальнейшем увеличении мощности прослоев практически не изменяется. Следует заметить, что экспериментальные кривые КС были получены при большом радиусе „скважины”, примерно равном мощности пластов. С уменьшением радиуса скважины, как это следует из [17], предельные значения дифференциации кривых должны достигаться при еще меньшей мощности пропластков.

Необходимо, наконец, остановиться на степени приближения $\rho_{K \text{ та}}$ против пластов высокого сопротивления к истинному удельному сопротивлению последних. Удельное сопротивление использовавшихся моделей пластов примерно в 200 раз превышало удельное сопротивление вмещающей среды, проводящих пропластков и „промывочной жидкости”. При рассмотрении кривых ρ_K , записанных зондами разных типов и размеров, можно отметить, что кажущееся сопротивление в точках максимума кривых КС растет с увеличением размера зонда, причем на кривых четырехэлектродных зондов оно выше, чем трехэлектродных, но не превышает $\rho_K/\rho_{\text{ВМ}} = 200$. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что кажущиеся сопротивления в максимумах кривых ρ_K , зарегистрированных четырехэлектродными зондами большого размера, ближе к истинным удельным сопротивлениям пластов, слагающих пачку, чем на кривых, полученных трехэлектродными зондами.

Обобщая проведенный выше анализ кривых ρ_K над пачкой тонких пластов высокого сопротивления, сделаем следующие выводы.

1. Дифференциация пачки по отношению к вмещающей среде на кривых ρ_K , записанных четырехэлектродными зондами, выше, чем на кривых ρ_K , зарегистрированных эквивалентными по размеру трехэлектродными зондами. При этом с увеличением размера зонда дифференциация увеличивается.

2. Экранные эффекты, наблюдаемые вне пачки по одну (для трех-

электродных зондов) или обе (для четырехэлектродных зондов) стороны от нее, уменьшаются по амплитуде с увеличением размера зонда по отношению к мощности пачки. При этом на кривых ρ_K четырехэлектродных зондов амплитуда экранных эффектов меньше, чем на кривых ρ_K эквивалентных по размеру трехэлектродных зондов.

3. В пределах пачки на кривых ρ_K , записанных трехэлектродными зондами, наблюдается экранирование, выражающееся в асимметрии кривых относительно середины пачки. Для четырехэлектродных зондов экранирование обуславливает разную амплитуду $\rho_K \max$ и $\rho_K \min$ против разных пластов и пропластков, хотя кривая в целом и симметрична относительно середины пачки.

4. Дифференциация кривых ρ_K , записанных четырехэлектродными зондами против пластов, слагающих пачку, выше дифференциации кривых, зарегистрированных эквивалентными по размеру трехэлектродными зондами. При этом степень дифференциации увеличивается с увеличением размера зонда и мощности проводящих пропластков, разделяющих пласты в пачке.

5. Кажущиеся сопротивления в максимумах кривых ρ_K , зарегистрированных четырехэлектродными зондами большого размера, численно ближе к истинным удельным сопротивлениям пластов, слагающих пачку, чем ρ_K трехэлектродных зондов.

Отмеченные особенности кривых ρ_K над пачкой, состоящей из 5 пластов высокого сопротивления, вполне справедливы и для пачек, состоящих из большего или меньшего количества пластов.

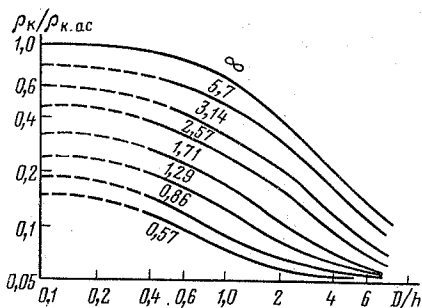
В целом, по результатам проведенного анализа кривых моделирования ясно, что использование четырехэлектродных зондов, особенно большого размера, для изучения тонкослоистых разрезов более предпочтительно по сравнению с трехэлектродными.

Определение глубинности исследования на моделях осуществлялось путем изучения влияния на регистрируемые четырехэлектродными градиент-зондами ρ_K зоны проникновения переменного радиуса и построения радиальных характеристик для пластов разной мощности и сопротивления. При этом удельные сопротивления вмещающей среды $\rho_{вм}$, „промывочной жидкости” ρ_c и зоны проникновения $\rho_{зп}$ были равны между собой.

Построенные по результатам моделирования радиальные характеристики приведены на рис. 37. Для более наглядного представления разницы между ρ_K , регистрируемыми четырехэлектродными градиент-зондами, и асимптотическими кажущимися сопротивлениями пласта на оси ординат указаны графики вместо отношения $\rho_{K,3сл}/\rho_{K,2сл}$ отложены значения $\rho_{K,3сл}/\rho_{K,ас}$ (индекс в числителе упрощен).

Из рис. 37 следует, что показания зонда бесконечно большого размера ($L/h = \infty$) при $D/h \rightarrow$ стремятся к асимптоте $\rho_K/\rho_{K,ас} = 1$. С увеличением диаметра зоны понижающего проникновения кажущееся

Рис. 37. Радиальные характеристики четырехэлектродных градиент-зондов (по результатам моделирования): $\rho_{\Pi}/\rho_{ЗП} = 18$, $\rho_{ЗП} = \rho_{ВМ} = \rho_{С}$; $h = 3,5$ см; $d = 1$ см; шифр кривых — $AB/2h = L/h$



сопротивление закономерно снижается по сравнению с асимптотическим. При этом отличие ρ_k от $\rho_{k,ас}$ на 5 % наблюдается при $D/h = 0,35$, а на 50 % — при $D/h = 1,5$. Например, пласт мощностью 5 м будет создавать аномалию, отличающуюся от максимальной (при отсутствии зоны проникновения) на 5 % при $D = 1,75$ м, на 50 % — при $D = 7,5$ м. Теоретически вычисленное расхождение ρ_k и $\rho_{k,ас}$ на 5 и 50 % должно наблюдаться соответственно при D/h , равных 0,32 и 1,7. Таким образом, экспериментальные данные хорошо совпадают с расчетными. Приведенные цифры свидетельствуют о большой глубинности исследования зондов с $L/h = \infty$ в пластах ограниченной мощности.

Для зондов конечного размера конфигурация радиальных характеристик сохраняется, но кажущееся сопротивление тем меньше, чем меньше размер зонда по сравнению с мощностью пласта. Как видно из рис. 37, при $L/h < 3$ для принятого отношения $\rho_{\Pi}/\rho_{ЗП} = 18$ показания зондов занижены более чем на 50 % по сравнению с $\rho_{k,ас}$. Объясняется это тем, что с уменьшением размера зонда соответственно снижается и глубинность исследования, в результате чего доля зоны понижающего проникновения в общем объеме захватываемой при измерениях среды увеличивается и, следовательно, кажущееся сопротивление соответственно уменьшается.

При сравнении радиальных характеристик четырехэлектродных градиент-зондов, полученных для различных соотношений $\rho_{\Pi}/\rho_{ЗП}$, видно, что с увеличением разницы в удельных сопротивлениях пласта и зоны проникновения спад радиальных характеристик с увеличением D/h становится круче, а глубинность исследования снижается тем больше, чем больше разница между ρ_{Π} и $\rho_{ЗП}$. Физически это вполне очевидно, ибо чем больше разница между удельными сопротивлениями пласта и зоны проникновения, тем больше будет сказываться изменение диаметра последней на регистрируемые ρ_k .

Полученные экспериментально радиальные характеристики зондов с $L/h = \infty$ подтверждают установленное в § 1 гл. II положение о том, что в случае пластов малой мощности радиус исследования ограничен некоторым предельным значением, изменяемым в зависимости от геоэлектрических параметров разреза.

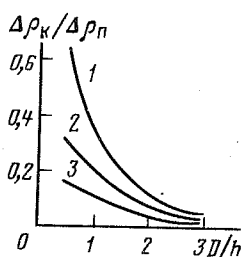


Рис. 38. Кривые чувствительности четырехэлектродных градиент-зондов большого размера к удельному сопротивлению пласта:

1 — $L = \infty$; 2 — $L = 4,54 h$ при $\rho_{\Pi} = (18 \div 50) \rho_{3П}$; 3 — $L = 4,54 h$ при $\rho_{\Pi} = (50 \div 100) \rho_{3П}$

По данным электролитического моделирования были рассчитаны кривые чувствительности четырехэлектродных градиент-зондов большого размера к удельному сопротивлению пласта с понижающим проникновением, показывающие, насколько изменяется ρ_k при изменении ρ_{Π} на 1 Ом·м при той или иной величине диаметра зоны проникновения (рис. 38).

Чувствительность зонда бесконечно большого размера к удельному сопротивлению пласта практически не зависит от величины последнего и уменьшается с увеличением диаметра зоны проникновения. Если принять за предельную чувствительность при выделении пласта величину $\Delta \rho_k / \Delta \rho_{\Pi} = 0,1$, то зонд бесконечно большого размера сможет выделять в разрезе пласты с диаметром зоны проникновения, равным $2h$. Снижение чувствительности зонда бесконечно большого размера к удельному сопротивлению при увеличении D/h свидетельствует о том, что глубинность исследования определяется как геометрическими, так и электрическими параметрами разреза.

Чувствительность зондов конечного размера, как это видно из рис. 38, ниже, чем у бесконечно больших. При этом она зависит от отношения удельных сопротивлений пласта и зоны проникновения: чем больше $\rho_{\Pi} / \rho_{3П}$, тем меньше чувствительность (кривые 2 и 3).

§ 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ЭЛЕКТРОИНТЕГРАТОРЕ ЭКСМ

При использовании электролитических моделей из плексиглаза в пределах моделируемого пласта и в непосредственной близости от него могли наблюдаться искажения, обусловленные его нулевой радиальной проводимостью. Использование моделей из цемента также не гарантировало абсолютной точности измерений в районе „ствола скважины”, поскольку при изготовлении их было трудно обеспечить строго постоянные параметры „скважины”. В связи с этим для получения более точной конфигурации кривых ρ_k в пределах моделируемого пласта и в непосредственной близости от него во ВНИИГеофизике на электроинтеграторе ЭКСМ был выполнен некоторый объем исследований четырехэлектродными градиент-зондами с $MN = 0,25 d_c$ против



Рис. 39. Кривые КС для одиночных пластов высокого сопротивления без проникновения в промывочной жидкости (с учетом влияния скважины) четырехэлектродных градиент-зондов:

а — 1–6 — для L/h , равных 0,5; 1; 2,5; 5; 10; 15 соответственно; б — 1–6 для L/h , равных 0,25; 0,5; 1,25; 2,5; 5; 7,5 соответственно; в — 1–6 для L/h , равных 0,125; 0,25; 0,625; 1,25; 2,5; 3,75 соответственно

одиночных пластов без проникновения и с проникновением промывочной жидкости, а также против пачки пластов. Кроме того, большое число кривых КС для таких зондов и условий было построено по данным измерений на электроинтеграторе ЭКСМ трехэлектродными градиент-зондами в процессе составления палеток ЭКЗ и ЭКЗТ. Правомочность этих построений основывается на том, что, как отмечалось в гл. III, § 3, кажущееся сопротивление в каждой точке кривой КС четырехэлектродного градиент-зонда может быть получено как полусумма ρ_k , регистрируемых в той же точке последовательным и обращенным зондами, построенными на базе использованного четырехэлектродного зонда.

На рис. 39 представлены кривые КС против одиночных пластов высокого сопротивления разной мощности без проникновения промывочной жидкости. Из рассмотрения этих кривых следует, что при $L/h > 1,5$ пласт выделяется в виде четкого симметричного максимума. Кажущееся сопротивление в максимумах кривых КС, регистрируемых последовательно увеличивающимися по размеру четырехэлектродными зондами, растет с увеличением h/d_c и L/h , причем первое из них сказывается значительно интенсивнее. Точки кривой, соответствующие границам пласта, с уменьшением отношения h/d_c смещаются в сторону экстремальных значений, а сама кривая становится более выположенной. Изменение величины отношения L/h практически не сказывается на положении точек кривых, приуроченных к границам

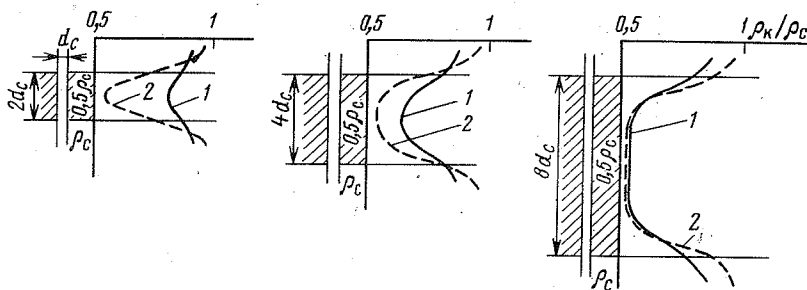


Рис. 40. Кривые КС четырехэлектродных градиент-зондов, полученные на ЭКСМ для одиночных пластов низкого сопротивления без проникновения промывочной жидкости:

1 - $L/d_c = 1$; 2 - $L/d_c = \infty$

пласта, если $L > h$. Увеличение отношений $\rho_{п}/\rho_{вм}$ и $\rho_{п}/\rho_{с}$ также ведет к росту $\rho_{к \max}$, причем в этом случае более интенсивное изменение $\rho_{к}$ наблюдается с изменением $\rho_{п}/\rho_{с}$, а на положении точек кривых, соответствующих границам пласта, величина этих отношений практически не сказывается.

Если размер зонда меньше или соизмерим с мощностью пласта, в середине максимума появляется локальный минимум, амплитуда которого тем больше, чем больше разница в удельных сопротивлениях пласта и вмещающих пород (см. рис. 39). Наличие этого минимума ограничивает применение четырехэлектродных зондов для изучения пластов, соизмеримых по мощности с удвоенным размером зонда и имеющих резко повышенное по сравнению с вмещающими породами удельное сопротивление.

На рис. 40 представлены кривые КС против одиночных пластов низкого сопротивления без проникновения. Так как расхождения между кривыми малы, то они приведены лишь для зондов с L/d_c , равных единице и ∞ . Из этих кривых видно, что пласты низкого сопротивления характеризуются симметричными минимумами, амплитуда которых растет с увеличением размера зонда и мощности пласта. При этом асимптотическое значение кажущегося сопротивления достигается при размерах зонда, значительно меньших, чем в случае пластов высокого сопротивления.

Из анализа кривых, полученных против одиночных пластов с повышающим и понижающим проникновением (рис. 41), можно сделать следующие выводы.

Неглубокое повышающее проникновение ($D/d_c = 2$) весьма мало сказывается на величине $\rho_{к \max}$ вне зависимости от мощности пласта. Увеличение диаметра зоны проникновения хотя и повышает $\rho_{к}$ в

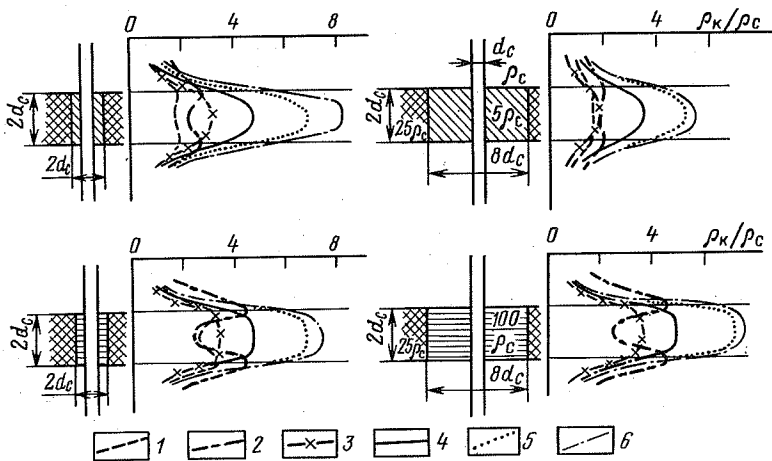


Рис. 41. Кривые КС четырехэлектродных градиент-зондов для одиночных пластов высокого сопротивления с проникновением промывочной жидкости:
1–6 – для L/h , равных 0,5; 1; 2,5; 5; 10; 15 соответственно

максимумах кривых КС, однако интенсивность этих изменений не столь велика, как при понижающем проникновении.

Конфигурация кривых КС при наличии повышающего проникновения почти не изменяется по сравнению с пластами без проникновения. Поэтому четкость определения границ пластов не снижается.

В случае понижающего проникновения $\rho_{зп} = \rho_{вм} = \rho_c$ кажущиеся сопротивления, регистрируемые четырехэлектродными градиент-зондами, закономерно снижаются, а аномальные участки кривых, соответствующие пласту, выполаживаются, расширяясь по оси глубин, в результате чего дифференциация и четкость определения границ ухудшаются. При сопротивлении зоны проникновения, отличном от сопротивления вмещающих пород и промывочной жидкости, дифференциация кривой КС хотя и уменьшается, четкость определения границ пласта по ней не снижается, так как аномальный участок кривой почти не расширяется по оси глубин в обе стороны от пласта, как это наблюдалось в случае, когда $\rho_{зп} = \rho_{вм} = \rho_c$, а строго локализован против пласта. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что основным фактором (не считая расстояния между измерительными электродами градиент-зонда), влияющим на степень дифференциации кривых КС и четкость определения по ним границ пластов, является разница в удельных сопротивлениях вмещающих пород и прискважинной части пласта. Этому способствует то обстоятельство, что с увеличением размера зонда создаваемое им электрическое поле в районе измерительных электродов все более приближается к однородному.

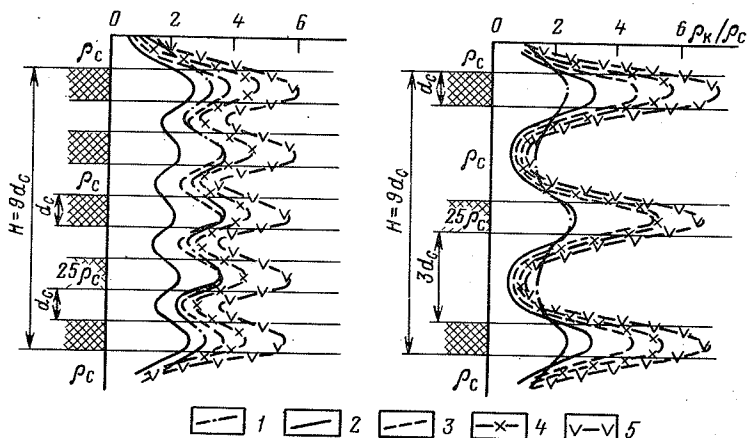


Рис. 42. Кривые КС четырехэлектродных градиент-зондов для пачки пластов высокого сопротивления (с учетом влияния скважины): 1-5 — для L/H , равных 0,22; 1,11; 2,22; 3,33; ∞ соответственно

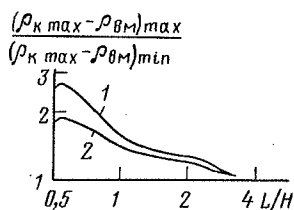
В целом анализ кривых КС против одиночных пластов без проникновения и с проникновением промысловой жидкости приводит к выводу о том, что симметричная форма их весьма благоприятна для интерпретации.

Для иллюстрации дифференцирующей способности четырехэлектродных градиент-зондов в слоистом разрезе на рис. 42 приведены кривые КС против пачки пластов высокого сопротивления, полученные на электроинтеграторе ЭКСМ при $MN = 0,25 d_c$.

Как следует из приведенного рисунка, при достаточно большой разнице в значениях $\rho_{\text{н}}$ пластов высокого и низкого сопротивления и малом расстоянии между измерительными электродами пласты (даже при мощности, равной d_c) в пачке отчетливо выделяются симметричными максимумами и минимумами. При этом кажущиеся сопротивления в максимумах и минимумах кривых КС растут с увеличением L/H . Увеличение мощности проводящих пластов в пачке приводит к увеличению дифференциации кривых КС как за счет роста (против пластов высокого сопротивления), так и за счет снижения $\rho_{\text{к}}$ (против проводящих прослоев практически до величины удельного сопротивления последних), что связано с резким уменьшением влияния соседних границ пластов друг на друга при увеличении расстояния между ними. Повышение удельного сопротивления пластов также приводит к увеличению дифференциации.

Таким образом, дифференциация кривых КС четырехэлектродных градиент-зондов против пачки пластов при $MN < d_c$ настолько хорошая, что позволяет выделять пласты даже при мощности, соизмеримой

Рис. 43. Кривые зависимости экранирования пластов высокого сопротивления, залегающих в пачке, от размеров зонда:
1, 2 — соответственно для пачек из пяти и трех пластов



с диаметром скважины. Отсутствие дифференциации кривой наблюдается только при мощности пластов и проводящих прослоев, соизмеримых по мощности с диаметром скважины и малой разнице в их удельных сопротивлениях.

Для иллюстрации зависимости степени экранирования пачки пластов от размеров четырехэлектродного зонда на рис. 43 приведены кривые $(\rho_k \max - \rho_{вм}) \max / (\rho_k \max - \rho_{вм}) \min = f(L/H)$, построенные с помощью диаграмм КС (см. рис. 42). Как видно из этих кривых, максимальное экранирование наблюдается при $L = 0,5H$. При увеличении размера зонда экранирование закономерно снижается. Уменьшение удельного сопротивления и количества пластов в пачке и увеличение мощности разделяющих их прослоев также приводит к уменьшению степени экранирования.

В целом результаты моделирования на электроинтеграторе ЭКСМ, как и материалы электролитического моделирования, полностью подтверждают теоретические положения, изложенные в гл. II и III.

§ 3. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ЭВМ

Математическое моделирование проводилось на ЭВМ М-222 с помощью программы, составленной во ВНИИГИСе Е.В. Чадаевым для расчета кажущихся сопротивлений в плоскопараллельной анизотропной среде без учета влияния скважины. Основная задача математического моделирования — изучение экранирования кривых КС, регистрируемых четырехэлектродными градиент-зондами.

Поскольку указанная выше программа позволяет рассчитывать кривые лишь для трехэлектродных градиент-зондов, то для получения кривых ρ_k четырехэлектродных зондов каждая модель просчитывалась дважды: для последовательного и обратного зондов. Затем вычисленные кривые суммировались с учетом принципа суперпозиции полей, в результате чего и получались кривые ρ_k четырехэлектродного градиент-зонда. Такая методика позволила не только выявить закономерности кривых КС четырехэлектродных зондов, но и сопоставить их с трехэлектродными градиент-зондами эквивалентного размера. Кривые рассчитывались без учета влияния скважины, что обус-

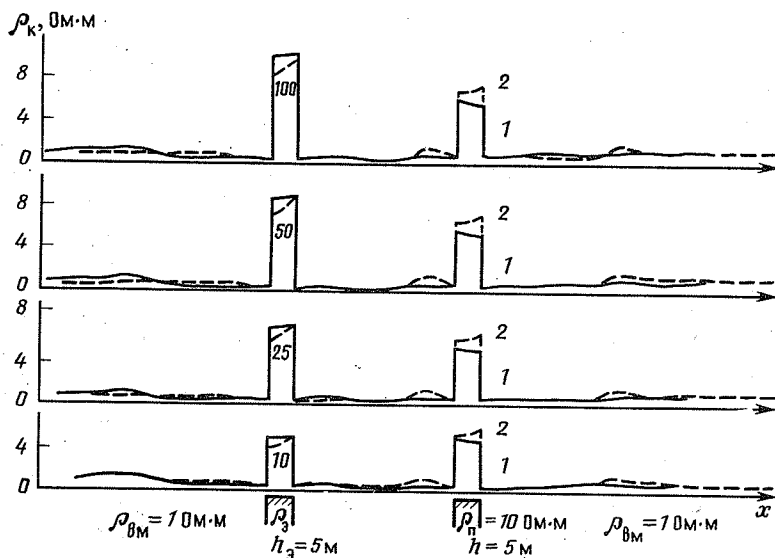


Рис. 44. Теоретические кривые КС для двух пластов высокого сопротивления без учета влияния скважины ($S/L = 1,2$; $L = 25$ м) для градиент-зондов: 1 — четырехэлектродных, 2 — трехэлектродных

ловило наиболее резкое проявление экранных эффектов и тем самым позволило оценить максимальное влияние экранирования.

Поскольку случай, когда экранируемый пласт находится в зоне минимума, подробно рассмотрен в гл. III, остановимся на кривых КС, полученных для двух пластов высокого сопротивления, отстоящих друг от друга на расстоянии $S = 30$ м, превышающем размер зонда (рис. 44). При этом удельное сопротивление экранированного пласта оставалось постоянным ($\rho_{\Pi} = 10$ Ом·м), а удельное сопротивление экранирующего пласта последовательно принимало значения $\rho_3 = 10, 25, 50$ и 100 Ом·м.

Интервал экранного минимума, сопровождающего пласт с одной стороны у трех- и с обеих сторон у четырехэлектродного зонда, с увеличением длины зонда возрастает, оставаясь примерно равным размеру последнего. При этом $\rho_{\text{к}}$ в экранном минимуме кривой КС четырехэлектродного зонда выше, чем у трехэлектродного, и с увеличением размера зонда стремится к удельному сопротивлению вмещающих пород. В области экранного максимума наблюдается обратная картина: $\rho_{\text{к max}}$ на кривой КС четырехэлектродного зонда меньше, чем у трехэлектродного, причем с увеличением размера зонда оно уменьшается, также стремясь к удельному сопротивлению вмещающих пород.

Искажающее влияние экранирования на соседние пласты можно оценить по величине относительного расхождения кажущегося сопротивления одиночного пласта в зоне экранирования по сравнению с удельным сопротивлением вмещающих пород. Очевидно, кажущееся сопротивление любого пласта, помещенного в зону экранирования другого пласта, будет завышено или занижено (в зависимости от знака экранирования) примерно во столько же раз, во сколько одиночный экранирующий пласт завышает или занижает в этом интервале удельное сопротивление вмещающих пород.

В рассматриваемом случае исследуемый пласт попадает в зону экранного максимума и, следовательно, ρ_k , регистрируемые против него, будут завышены по сравнению с кажущимися сопротивлениями такого же, но одиночного пласта. Действительно, сравнивая кривые КС для одиночного пласта с $\rho_{\Pi} = 10$ Ом·м (верхние кривые на рис. 32) и для пласта, подверженного повышающему экранированию (нижние кривые на рис. 44), можно отметить, что в случае трехэлектродного зонда ρ_k экранированного пласта завышено по сравнению с одиночным примерно на 19, а в случае четырехэлектродного зонда – на 11 %. Увеличение удельного сопротивления экранирующего пласта от 10 до 100 Ом·м ведет к закономерному росту кажущегося сопротивления против экранированного пласта для трехэлектродного зонда на 14,3, а для четырехэлектродного – на 11 % (верхние кривые на рис. 44).

Сравнивая влияние экранирующего пласта при $S < L$ (см. рис. 32) и $S > L$, можно констатировать, что во втором случае оно сказывается на кажущихся сопротивлениях, регистрируемых против экранированного пласта, существенно меньше, причем расхождения в показаниях трех- и четырехэлектродных зондов в этом случае также уменьшаются.

Изменение экранирующего влияния двух пластов высокого сопротивления на вмещающие породы и друг на друга в зависимости от размера зонда при $S > L$ удобно проследить по рис. 45, на котором приведены кривые КС градиент-зондов разного размера, рассчитанные на ЭВМ без учета влияния скважины для модели, состоящей из двух пластов с удельными сопротивлениями $\rho_{\Pi} = 10$ Ом·м и мощностью $h = 5$ м, залегающих в однородной вмещающей среде с $\rho_{\text{ВМ}} = 1$ Ом·м. Расстояние между пластами S изменяется в соответствии с изменением размера зонда L так, что отношение S/L , равное 1,2, остается неизменным.

Как видно из этого рисунка, ρ_k , регистрируемые против обоих пластов, с увеличением размера зонда систематически растут. При этом оба пласта на кривых КС трехэлектродного зонда, несмотря на одинаковое удельное сопротивление, отмечаются различными кажущимися сопротивлениями, а сами кривые против пластов имеют асимметричный характер. Конфигурация кривых КС четырехэлектродного зонда и регистрируемые кажущиеся сопротивления против обоих

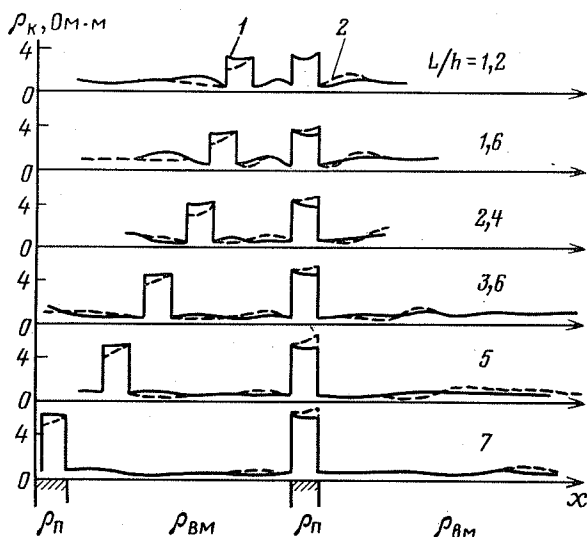


Рис. 45. Теоретические кривые КС для двух пластов высокого сопротивления без учета влияния скважины ($S/L = 1,2$) для градиент-зондов: 1 — четырехэлектродных, 2 — трехэлектродных

пластов совершенно тождественны, что свидетельствует об одинаковом влиянии соседних пластов друг на друга. Кажущиеся сопротивления, регистрируемые в области экранированных максимумов и минимумов, с увеличением размера зонда все меньше отличаются от удельного сопротивления вмещающих пород. При этом показания четырехэлектродного зонда во всех случаях ближе к последним. Увеличение удельного сопротивления одного из пластов высокого сопротивления приводит к уменьшению $\rho_{к \min}$ и увеличению $\rho_{к \max}$ против прослоя, разделяющего пласты, а также во вмещающих породах, расположенных со стороны этого пласта (см. рис. 44).

С увеличением мощности экранирующего пласта степень экранирования систематически возрастает как против экранированного пласта, так и во вмещающей его среде. При этом четырехэлектродные градиент-зонды и в данном случае подвержены влиянию экранирования меньше, чем трехэлектродные.

Экранирование пачки пластов высокого сопротивления подчиняется тем же закономерностям, что и для одиночного пласта.

На основании вышеизложенного сделаем такие основные выводы.

1. Экранирование кривых КС пластами высокого сопротивления на результатах измерений четырехэлектродными градиент-зондами сказывается меньше, чем на трехэлектродных зондах.

2. Увеличение размера зондов как трех-, так и четырехэлектрод-

ных ведет к закономерному уменьшению амплитуды экранирования.

3. Увеличение удельного сопротивления и мощности экранирующего пласта приводит к увеличению влияния экранирования.

4. Влияние экранирования больше сказывается при расстоянии между пластами, меньшем размера зонда ($S < D$).

5. Пачки пластов высокого сопротивления испытывают экранное влияние в такой же степени, как и одиночный пласт.

В целом моделирование на ЭВМ, так же как и на электролитических моделях и электроинтеграторе ЭКСМ, полностью согласуется с теоретическими данными, приведенными в гл. II и III, а в ряде случаев позволяет их детализировать.

Глава V

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДИАГРАММ КС ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНЫХ ГРАДИЕНТ-ЗОНДОВ БОЛЬШОГО РАЗМЕРА

При интерпретации кривых КС, зарегистрированных четырехэлектродными градиент-зондами большого размера, можно решать следующие задачи промысловой геофизики:

определять местоположение границ раздела пород различного удельного сопротивления;

определять истинные удельные сопротивления пластов;

разделять коллекторы, предварительно выявленные с помощью методов определения пористости, на нефте- и водонасыщенные.

Как правило, решение первой и третьей задач производится одновременно при совместном анализе кривых КС четырехэлектродных градиент-зондов с диаграммами других методов ГИС. Вторая задача требует для своего решения использования специальных приемов. В настоящее время разработаны палеточный способ интерпретации для одиночных пластов, а также методика приближенной количественной интерпретации для пластов, залегающих в слоистой среде, позволяющие определять удельные сопротивления с удовлетворительной точностью. Разработка строгой методики количественной интерпретации для пластов ограниченной мощности, залегающих в условиях частого переслаивания пород разного удельного сопротивления, в связи с необходимостью учета большого объема среды, окружающей измерительную установку, является весьма сложной задачей, которая в настоящее время находится в стадии решения.

§ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ПЛАСТОВ

Определение границ пластов базируется на анализе конфигурации теоретических и модельных кривых КС, регистрируемых четырехэлектродными градиент-зондами большого размера против одиночных пластов высокого и низкого сопротивления, а также их пачек.

Кривые КС для одиночных пластов высокого сопротивления (см. рис. 39) при $L/h > 1,5$ вследствие симметрии зонда отмечаются четкими симметричными максимумами. Границы пластов соответствуют точкам с наибольшей крутизной кривых КС. При $h/d_c \leq 2+3$ точки кривой, соответствующие границам пласта, смещаются в сторону экстремума, а сама кривая становится более выположенной. Увеличение отношений $\rho_{\Pi} / \rho_{\text{ВМ}}$ и $\rho_{\Pi} / \rho_{\text{С}}$ на положении точек кривых, соответствующих границам пласта, практически не сказывается.

Если размер зонда меньше или соизмерим с половиной мощности пласта, в средней части максимума, соответствующего пласту высокого сопротивления, появляется локальный минимум, амплитуда которого тем больше, чем больше разница между ρ_{Π} и $\rho_{\text{ВМ}}$. Тем не менее и в этом случае границы пласта определяются по точкам перегиба кривой КС на участках перехода ее от пласта к вмещающим породам.

Наличие понижающего или, тем более, повышающего проникновения практически не влияет на положение точек кривой КС, соответствующих границам пласта (см. рис. 41). Лишь в том весьма редком случае, когда $\rho_{\text{ЗП}} = \rho_{\text{ВМ}} = \rho_{\text{С}}$, аномальные участки кривых, соответствующие пластам, выполаживаются, расширяясь по оси глубин, в результате чего четкость определения границ пластов ухудшается.

Границы пластов низкого (по сравнению с вмещающими породами) сопротивления являются одновременно кровлей и подошвой соседних пластов более высокого сопротивления. Поэтому правила их определения аналогичны вышеописанным.

В целом следует отметить, что симметричная форма кривых, регистрируемых четырехэлектродными градиент-зондами, весьма благоприятна для интерпретации и обычно не вызывает затруднений при определении границ одиночных пластов. Тем не менее, во всех случаях, когда это возможно, желательно данные, получаемые с помощью четырехэлектродных градиент-зондов, сравнивать с отбивками, выполненными по другим методам ГИС (особенно микрометодам), и окончательное заключение о местоположении пласта давать с учетом всех имеющихся материалов. Особенно это целесообразно в тех случаях, когда предполагается влияние экранирования.

Пачка тонких пластов высокого сопротивления отмечается на кривых КС четырехэлектродных зондов участком повышенных значений кажущегося сопротивления, соответствующим интервалу ее

залегания (см. рис. 42). При этом локальными максимумами и минимумами в пределах участка общего увеличения ρ_K , соответствующего пачке, отмечаются все пласты высокого сопротивления и разделяющие их проводящие пропластки. Поэтому определение границ пластов, залегающих в пачке, как и границ всей пачки в целом, осуществляется так же, как и в случае одиночных пластов высокого сопротивления, т.е. по точкам перегиба кривой КС.

§ 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛАСТОВ

Количественная интерпретация является завершающим этапом обработки промыслово-геофизической информации и заключается в определении численных значений геометрических и физических параметров пластов, слагающих разрез. Для электрометрии эта задача чаще всего решается с помощью соответствующих палеток. Однако палетки ЭКЗ и ЭКЗТ, предназначенные для интерпретации кривых зондирования в одиночных пластах ограниченной мощности, имеют слишком короткие правые ветви, а палетка ТП-2, специально рассчитанная для интерпретации правых ветвей кривых зондирования, не учитывает влияния ствола скважины. Поэтому применение их для интерпретации данных, получаемых градиент-зондами большого размера, невозможно.

В то же время отмеченные выше особенности влияния скважины на кривые КС, регистрируемые градиент-зондами большого размера в пластах ограниченной мощности, позволяют легко продолжить правые ветви кривых ЭКЗ и ЭКЗТ. Действительно, тот факт, что правые ветви кривых зондирования с учетом и без учета влияния скважины при $L/h \geq 3$ располагаются параллельно друг другу на расстоянии, определяемом разницей между удельным и асимптотическим кажущимся сопротивлениями, позволяет, зная последнее, сместить кривую $\rho_K/\rho_{ВМ} = f(L/h)$ палетки ТП-2 в вертикальном направлении на величину $(\rho_{П} - \rho_{К.ас})$ и таким образом получить правую ветвь кривой зондирования с учетом влияния скважины. Практически поступают следующим образом.

На прозрачном билогарифмическом бланке со стандартным модулем, на котором хотят построить палетку с учетом влияния скважины для постоянных значений $\rho_{ВМ}/\rho_c$ и h/d_c , в правой части наносят штрихами величины $\rho_{К.ас}/\rho_c$ для всех отношений $\rho_{П}/\rho_{ВМ}$, для которых имеются кривые на палетке без учета влияния скважины. Затем бланк накладывают на палетку так, чтобы их оси координат совпали.

Далее смещают бланк по палетке в вертикальном направлении до тех пор, пока правая асимптота палеточной кривой с выбранным отношением $\rho_{П}/\rho_{ВМ}$ не совместится с соответствующим ей значением

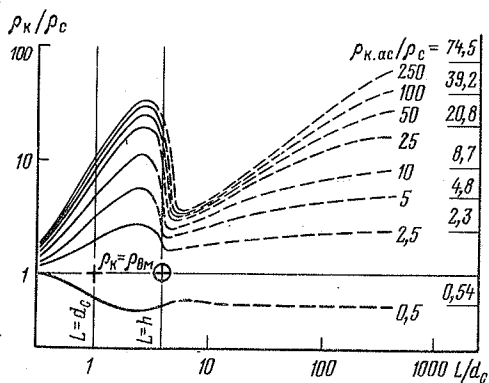


Рис. 46. Палетка двухслойных экстремальных кривых зондирования с продленными правыми ветвями (ЭКЗ-п):

$\rho_{вм} = \rho_c$; $h/d_c = 4$; шифр кривых — $\rho_{п}/\rho_c$

$\rho_{к.ас}/\rho_{вм}$, нанесенным на бланке, после чего переносят на него с палеток эту кривую, которая и будет правой ветвью кривой зондирования с учетом влияния скважины. Затем те же операции повторяют для кривой со следующим значением отношения $\rho_{п}/\rho_{вм}$ и т.д. В итоге получают палетку зависимостей $\rho_{к}/\rho_{вм} = f(L/h)$ для постоянных значений h/d_c , $\rho_{вм}/\rho_c$ и $\rho_{п}/\rho_c$, которую можно использовать для количественной интерпретации правых ветвей кривых зондирования, построенных по результатам измерений градиент-зондами большого ($L > h$) размера. Палетку можно вычертить на одном бланке с палеткой ЭКЗ для тех же значений параметров $\rho_{вм}/\rho_c$ и h/d_c , которые использовались при построениях. При этом, если $\rho_{вм} = \rho_c$, то шифр кривых палетки ЭКЗ $\rho_{п}/\rho_c$ будет соответствовать шифру кривых построенной палетки. Если же $\rho_{вм} \neq \rho_c$, то шифр кривых последней для приведения его в соответствие с кривыми палетки ЭКЗ должен быть умножен на величину отношения $\rho_{вм}/\rho_c$, которое было принято при построениях.

На рис. 46 в качестве примера приведена одна из палеток ЭКЗ-п (экстремальных кривых зондирования с продленными правыми ветвями), построенная описанным способом. В левой части теоретические кривые зондирования полностью совпадают с кривыми соответствующей палетки ЭКЗ, а правые ветви плавно стремятся к асимпote с ординатой, равной $\rho_{к.ас}/\rho_c$. Последние нанесены у правой рамки палетки штрихами, над которыми указаны численные значения $\rho_{к.ас}/\rho_c$. В области стыка правые и левые ветви теоретических кривых зондирования сливаются друг с другом.

Правые части описанных палеток могут использоваться для интерпретации данных, получаемых градиент-зондами большого размера лишь в одиночных пластах без проникновения. При этом методика

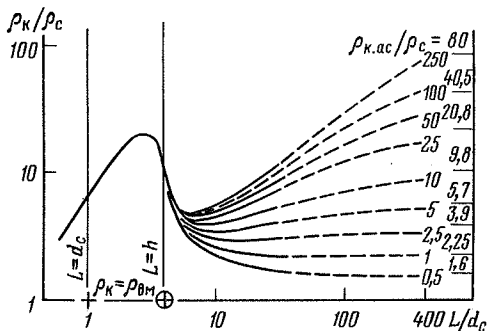


Рис. 47. Палетка трехслойных экстремальных кривых зондирования с продленными правыми ветвями (ЭКЗТ-п-4-1):

$\rho_{вм} = \rho_c$; $h/d_c = 4$; $D/d_c = 8$; $\rho_{зп} = 25 \rho_c$; шифр кривых — $\rho_{п}/\rho_c$

работы с ними не отличается от методики интерпретации правых ветвей кривых зондирования. Для интерпретации кривых зондирования при наличии проникновения аналогичным описанному выше способом могут быть получены трехслойные палетки ЭКЗТ-п (экстремальные кривые зондирования трехслойные, продленные).

Действительно, зону проникновения промывочной жидкости в пласт можно представить как эквивалентное изменение диаметра скважины: увеличение при понижающем проникновении и уменьшение — при повышающем. Следовательно, суммарное влияние, оказываемое ею и скважиной, будет подчиняться тем же закономерностям, что и влияние одной скважины, и для построения правых ветвей кривых зондирования с помощью палетки ТП-2 в этом случае необходимо знать лишь численные значения $\rho_{к.ас}$ для разных значений параметров пласта и зоны проникновения.

На рис. 47 в качестве примера приведена одна из трехслойных палеток — ЭКЗТ-п-4-1, построенных по описанной методике. Как следует из этого рисунка, правые ветви трехслойных кривых зондирования, так же как и двухслойных, с увеличением размера зонда, удаляясь друг от друга, плавно стремятся к асимптоте, равной отношению $\rho_{к.ас}/\rho_c$. При этом кривая с модулем, соответствующим сопротивлению зоны проникновения ($\rho_{п}/\rho_c = \rho_{зп}/\rho_c$), имеет такое же численное значение $\rho_{к.ас}/\rho_c$, как и на двухслойной палетке, тогда как у кривых с $\rho_{п}/\rho_c \neq \rho_{зп}/\rho_c$ оно отличается от $\rho_{к.ас}/\rho_c$, характерного для соответствующих по модулю двухслойных кривых.

Применение палеток ЭКЗ-п и ЭКЗТ-п ограничено случаем одиночного пласта, залегающего в однородных вмещающих породах, что является достаточно редким, особенно при исследовании скважин установками большого размера. В случае чередования пластов высокого и низкого сопротивления характер распределения электричес-

кого поля, по сравнению с одиночным пластом, существенно изменяется, что связано главным образом с анизотропией разреза.

При наличии горизонтально-слоистой среды и вертикальном положении измерительной установки поперечное удельное электрическое сопротивление определяется [15] как

$$\rho_n = E_n / j_n, \quad (66)$$

где E_n – вертикальная составляющая напряженности электрического поля, а j_n – реальное значение нормальной составляющей плотности тока в точке измерения.

Так как плотность тока измерить невозможно, то вместо ρ_n определяется кажущееся сопротивление из выражения

$$\rho_{kn} = E_n / j_0, \quad (67)$$

где j_0 – теоретическая величина нормальной составляющей плотности тока в точке измерения, вычисленная в предположении, что все пространство заполнено однородной и изотропной средой.

В случае горизонтально-слоистого разреза, который в первом приближении можно аппроксимировать однородной анизотропной средой,

$$j_0 / j_n = \lambda_c^2, \quad (68)$$

где λ_c – коэффициент анизотропии всей толщи пород, расположенной как в пределах измерительной установки, так и на некотором расстоянии за ее границами.

Следовательно,

$$\rho_{kn} = E / (j_n \lambda_c^2) = \rho_n / \lambda_c^2. \quad (69)$$

Кроме того, известно [15], что $\rho_{kn} = \rho_m / \lambda = \rho_t$.

При наличии микроанизотропии самих исследуемых пластов возможны следующие случаи:

$$\text{если } \lambda_{\Pi} = \lambda_c, \text{ то } \rho_{kn} = \frac{\rho_{\Pi}}{\lambda_c^2} = \frac{\rho_{\Pi}}{\lambda_{\Pi}^2} = \rho(t); \quad (70)$$

$$\text{если } \lambda_{\Pi} > \lambda_c, \text{ то } \rho_{kn} = \frac{\rho_{\Pi}}{\lambda_c^2} = \frac{\lambda_{\Pi}^2 \rho_{\Pi}}{\lambda_c^2 \lambda_{\Pi}^2} = \left(\frac{\lambda_{\Pi}}{\lambda_c} \right)^2 \rho_t > \rho_t; \quad (71)$$

$$\text{если } \lambda_{\Pi} < \lambda_c, \text{ то } \rho_{kn} = \frac{\rho_{\Pi}}{\lambda_c^2} = \left(\frac{\lambda_{\Pi}}{\lambda_c} \right)^2 \rho_t < \rho_t. \quad (72)$$

Таким образом, из выражений (70) – (72) следует, что в случае анизотропного разреза регистрируемое кажущееся сопротивление

будет либо равняться продольному сопротивлению ρ_l слагающих его пластов, либо отличаться от него в большую или меньшую сторону.

Так обстоит дело при отсутствии влияния скважины. Наличие последней коренным образом изменяет ситуацию.

Как было установлено ранее, при использовании четырехэлектродных градиент-зондов в средней части пространства, охватываемого измерительной установкой, образуется область квазиоднородного поля, в которой эквипотенциальные поверхности в удалении от границ пласта представляют собой плоскости, параллельные напластованию пород. Вследствие этого падение потенциала на участке MN в скважине будет равно падению потенциала на таком же интервале в пласте. Иначе говоря, если плотность тока остается постоянной, то регистрируемая диаграмма ρ_K будет в некотором масштабе соответствовать диаграмме ρ_n [3].

Таким образом, задача сводится к определению соотношения между j_0 и j_n в реальных условиях измерений.

Ствол скважины с расположенной по ее оси измерительной установкой „включен” в цепь питающих электродов AB параллельно со слоистой толщей окружающих пород с коэффициентом анизотропии λ_c . Очевидно, что слоистая среда будет препятствовать прохождению тока от одного питающего электрода к другому тем больше, чем больше λ_c . Вследствие этого плотности тока в скважине, имеющей меньшее сопротивление по сравнению с поперечным сопротивлением всей толщи, заключенной между электродами A и B , будет повышена.

Поскольку поперечное удельное сопротивление ρ_n превышает среднее квадратическое сопротивление ρ_m в λ_c раз, очевидно, что и плотность тока в скважине будет повышена по сравнению с однородной средой в λ_c раз. При этом, как показал Л.М. Альпин в [3], увеличение плотности тока в скважине при достаточно больших размерах установки практически не сказывается на плотности тока в окружающей скважину среде. В то же время из выражения (68) следует, что в анизотропной среде без скважины вертикальная составляющая плотности тока в $1/\lambda_c^2$ раз меньше, чем в однородной изотропной среде.

Таким образом, с одной стороны, за счет анизотропии разреза нормальная составляющая плотности тока в точке измерений уменьшается в $1/\lambda_c^2$ раз, а с другой, из-за наличия скважины, — увеличивается в λ_c раз. Следовательно, для нормальной составляющей плотности тока в анизотропной среде со скважиной можно записать

$$j_n = j_0 \lambda_c / \lambda_c^2 = j_0 / \lambda_c. \quad (73)$$

Подставляя j_0 из (73) в (67), получим

$$\rho_{Kn} = E / (j_n \lambda_c) = \rho_n / \lambda_c. \quad (74)$$

Далее, по аналогии с (70) – (72):

$$\text{если } \lambda_{\Pi} = \lambda_c, \text{ то } \rho_{\text{КП}} = \frac{\rho_n}{\lambda_c} = \frac{\rho_n}{\lambda_{\Pi}} = \rho_m; \quad (75)$$

$$\text{если } \lambda_{\Pi} > \lambda_c, \text{ то } \rho_{\text{КП}} = \frac{\rho_n \lambda_{\Pi}}{\lambda_c \lambda_{\Pi}} = \frac{\lambda_{\Pi}}{\lambda_c} \rho_m > \rho_m; \quad (76)$$

$$\text{если } \lambda_{\Pi} < \lambda_c, \text{ то } \rho_{\text{КП}} = \frac{\rho_n}{\lambda_c} = \frac{\lambda_{\Pi}}{\lambda_c} \rho_m < \rho_m. \quad (77)$$

Из выражений (75) – (77) следует, что в случае анизотропного разреза и наличия ствола скважины регистрируемое кажущееся сопротивление будет либо равняться среднему квадратическому удельному сопротивлению ρ_m слагающих его пластов, либо отличаться от него в большую или меньшую сторону в зависимости от соотношения λ_{Π} и λ_c .

Известно, что коэффициент анизотропии осадочных пород изменяется в основном в пределах 1,05 – 1,5, что, как правило, меньше общего коэффициента анизотропии толщи, охватываемой измерительной установкой. Вследствие этого регистрируемое ею кажущееся сопротивление будет несколько меньше ρ_m , находясь между значениями ρ_m и ρ_t .

Как было показано ранее, наличие экранирующих пластов высокого сопротивления, расположенных за пределами измерительной установки, повышает плотность тока в области пространства, охватываемой питающими электродами. Следовательно, хотя за счет анизотропии разреза плотность тока в районе точки записи при наличии скважины и понижается в $1/\lambda_c$ раз, экранирующие пласты высокого сопротивления в значительной степени компенсируют это понижение.

Таким образом, в случае чередования пластов высокого и низкого сопротивления, с которым чаще всего приходится иметь дело на практике при исследовании скважин четырехэлектродными градиент-зондами большого размера, благодаря влиянию скважины и пластов высокого сопротивления, расположенных за пределами измерительной установки, регистрируемые кажущиеся сопротивления; как правило, близки к истинным удельным сопротивлениям пластов, что подтверждается результатами статистической обработки материалов измерений в скважинах. Только при наличии в разрезе значительного количества пластов очень высокого сопротивления кажущиеся сопротивления с режимом увеличением коэффициента анизотропии могут быть существенно занижены по сравнению с удельными.

Следует остановиться еще на одном факторе, влияющем на результаты измерений четырехэлектродными градиент-зондами большого размера.

Как уже отмечалось, влияние ствола скважины на ρ_K , регистрируемые градиент-зондами большого размера в пластах ограниченной ($h < L$) мощности, проявляется в параллельности кривых зондирования, полученных с учетом и без учета влияния скважины. При этом расстояние между ними определяется разницей между истинным удельным сопротивлением пласта ρ_{Π} и асимптотическим кажущимся сопротивлением $\rho_{K,ac}$, к которому стремится ρ_K при неограниченном увеличении размера зонда и наличии ствола скважины.

Установленные закономерности позволяют ввести поправку за ограниченную мощность пласта с помощью зависимостей $\rho_{K,ac}/\rho_c = f(\rho_{\Pi}/\rho_c)$ (см. рис. 26). С этой целью по известному значению ρ_{BM}/ρ_c выбирается сначала семейство кривых, а в нем, по отношению h/d_c — нужная кривая. При этом в качестве ρ_{BM} можно использовать кажущееся сопротивление, отсчитанное непосредственно с диаграмм против пород, соседних с интерпретируемым пластом, а если оно различается, то — среднее арифметическое из ρ_K , считанных против пластов, залегающих выше и ниже исследуемого. Затем на оси ординат находят ρ_K/ρ_c , полученное по результатам измерений в скважине. Проводя горизонтальную линию до пересечения с выбранной кривой и снося точку пересечения на ось абсцисс, получают отношение ρ_{Π}/ρ_c , из которого определяют ρ_{Π} . Эту величину в первом приближении и можно использовать в качестве удельного сопротивления пласта.

При необходимости получения более точной величины удельного сопротивления алгоритм интерпретации, исходя из всего изложенного, будет следующим.

С помощью зависимостей на рис. 26 в зарегистрированные ρ_K вводится поправка за ограниченную мощность пластов так, как было описано выше. Эта операция осуществляется для всех пластов, расположенных в пределах измерительной установки при положении точки записи ее против интерпретируемого пласта.

Используя исправленные за ограниченную мощность пласта значения ρ_K , по методике, описанной в гл. III, § 4, подсчитывается коэффициент анизотропии всей толщи пород, залегающих в пределах измерительной установки.

В кажущееся сопротивление интерпретируемого пласта, исправленное за ограниченную мощность, вносится поправка за экранирование с помощью зависимостей $\rho_K/\rho_1 = f(x/L)$ (см. рис. 30). С этой целью сначала по диаграмме КМ определяется расстояние x от токового электрода А до ближайшей к нему границы экранирующего пласта и его сопротивление. Так как при $\rho_3 > 10 \rho_{BM}$ величина экранирования мало зависит от удельного сопротивления экранирующих пластов, то в качестве последнего можно использовать его кажущееся сопротивление, считанное непосредственно с диаграммы. В качестве ρ_1 следует брать среднее квадратическое сопротивление всей анизотропной

толщи, находящейся между токовыми электродами зонда.

По найденным значениям сопротивлений ρ_2 и ρ_1 на рис. 30 выбирается соответствующая кривая. Затем по известному расстоянию x от токового электрода до экранирующего пласта и размеру установки L находят на оси ординат величину завышения кажущегося сопротивления исследуемого пласта, обусловленного влиянием экранирования. Изложенные операции повторяют для электрода B , причем поправка вносится в ρ_k , уже исправленное за экранирование пластом, расположенным со стороны электрода A .

Если за пределами измерительной установки пласты высокого сопротивления отсутствуют, то кажущееся сопротивление исследуемого пласта будет занижено за счет „оттягивания” токовых линий электрического поля в проводящую вмещающую среду. В этом случае введение поправки за экранирование осуществляется так же, как и в случае экранирующих пластов высокого сопротивления. Только соотношение сопротивлений экранирующего пласта и вмещающих пород (ρ_1 , см. рис. 30) берется обратным тому, которое использовалось при повышающем экранировании.

Полученное в результате предыдущей операции ρ_k , исправленное за влияние экранирования, умножается на вычисленный ранее (см. п.2) коэффициент анизотропии толщи пород, охватываемых измерительной установкой, итогом чего явится приближенное значение удельного электрического сопротивления пласта.

В заключение следует отметить, что выполнение перечисленного комплекса операций вручную – весьма трудоемкий процесс. Поэтому его целесообразно проводить на ЭВМ.

Проверка возможности применения описанной методики количественной интерпретации осуществлялась на эталонном разрезе, кривая КС которого была рассчитана на ЭВМ с учетом влияния скважины. Разрез состоит из 42 пластов, удельное сопротивление которых изменяется от 1 до 450 Ом·м, а диапазон изменения мощности составляет 0,6–8,8 м. Расчет производился отдельно для последовательного А25М0,5N и обращенного М0,5N25В трехэлектродных зондов с последующим построением кривой ρ_k четырехэлектродного зонда А25М0,5N25В на основании принципа суперпозиции полей.

На рис. 48 приведен график изменения удельного сопротивления пластов разреза, а также кривые кажущегося сопротивления четырехэлектродного и равных ему по размерам трехэлектродных зондов. Все пласты, слагающие разрез, отразились на диаграмме КС четырехэлектродного зонда, причем соотношение кажущихся сопротивлений против пластов качественно соответствует соотношению их удельных сопротивлений. Наиболее четко выделяются пласты в контрастных частях разрезов, т.е. при чередовании пластов высокого и низкого сопротивлений. В этом случае конфигурация кривой КС четырехэлек-

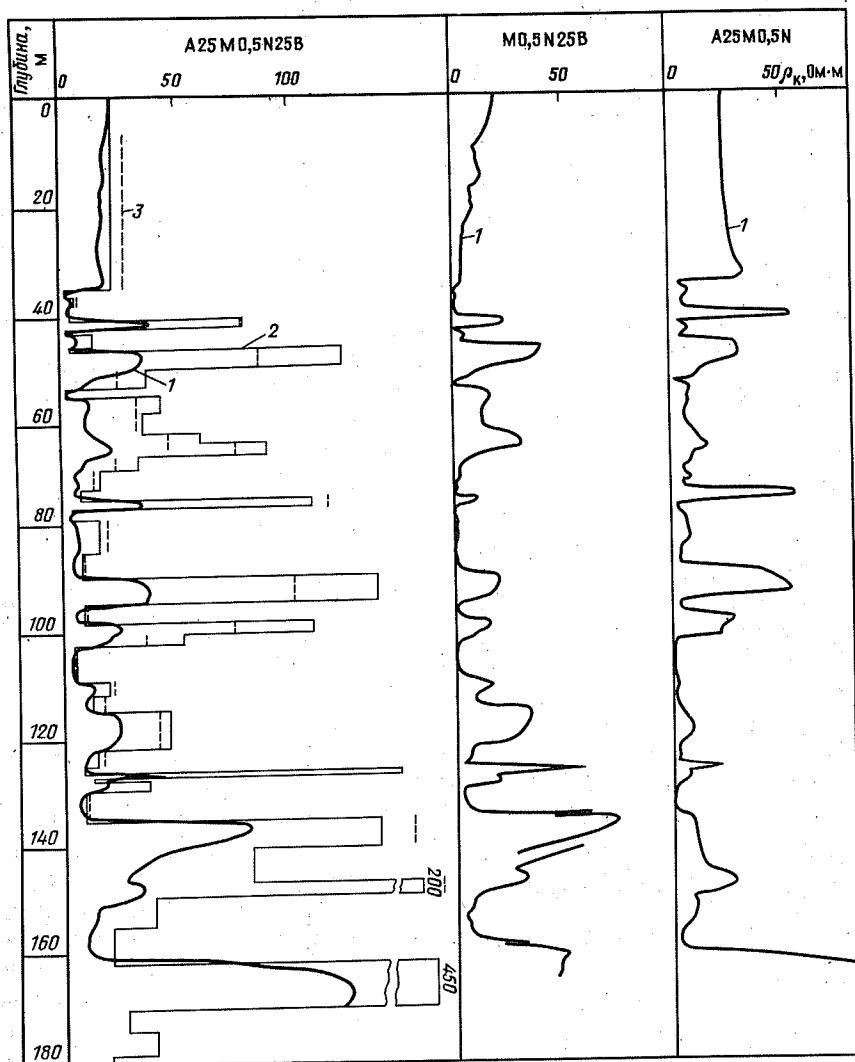


Рис. 48. Эталонный разрез ρ_K .
Кривые: 1 — ρ_K ; 2 — ρ_H ; 3 — ρ_H^* (по результатам интерпретации)

тродного зонда практически симметрична, а границам пластов соответствуют точки перегиба. Несколько менее четко выделяются на диаграмме четырехэлектродного зонда пласты, удельное сопротивление которых изменяется ступенчато. Тем не менее и в этом случае все их можно выделить по точкам перегиба кривой КС. В целом по внешнему виду эталонная кривая КС четырехэлектродного градиент-зонда имеет

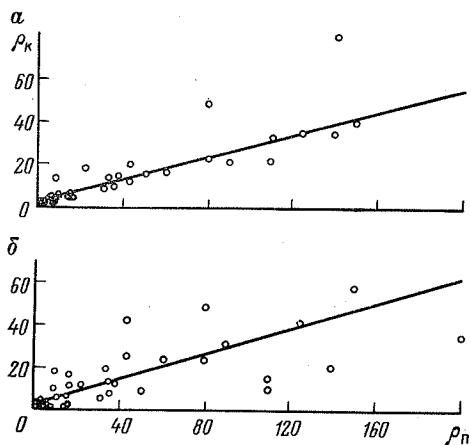


Рис. 49. Корреляционные зависимости между $\rho_{п}$ и $\rho_{к}$ для зондов: а — А25М0,5N25В; б — М0,5А25В

очень близкий характер с кривыми $\rho_{к}$, регистрируемыми в скважинах.

При анализе кривых КС трехэлектродных зондов обращает на себя внимание тот факт, что они отнюдь не всегда верно отражают характер изменения истинного удельного сопротивления. При этом диаграммы последовательного и обращенного зондов в целом и кажущиеся сопротивления на них, соответствующие отдельным пластам, существенно различаются между собой, что обусловлено сильным и различным по величине и знаку влиянием экранирования при положении токового электрода в разных частях разреза. Кривая КС четырехэлектродного зонда испытывает меньшее влияние экранирования, косвенным доказательством чего является подобие конфигурации кривой против отдельных пластов разреза форме кривой против одиночных пластов.

Для изучения характера связи между кажущимися и удельными сопротивлениями пластов эталонного разреза были построены зависимости $\rho_{к} = f(\rho_{п})$ для четырехэлектродного (рис. 49, а) и обращенного трехэлектродного (рис. 49, б) зондов, составлены уравнения линейной регрессии и вычислены коэффициенты корреляции. Для четырехэлектродного зонда уравнение регрессии имеет вид $y = 0,265x + 2,739$, а коэффициент корреляции $r = 0,930$. Для трехэлектродного зонда уравнение регрессии $y = 0,321x + 2,841$, а коэффициент корреляции $r = 0,802$.

Из рис. 49 и приведенных коэффициентов корреляции видно, что у четырехэлектродного зонда между удельным и кажущимся сопротивлениями наблюдается более тесная корреляционная зависимость, причем разброс точек относительно линии регрессии сравнительно невелик (остаточная дисперсия $\bar{S}_{ост} = 72,31$). У трехэлектродного зонда

теснота связи между ρ_{Π} и ρ_K хуже, а разброс точек от линии регрессии больше (остаточная дисперсия $S_{\text{ост}} = 377,9$). Это обусловлено большим влиянием на электрическое поле трехэлектродного зонда неоднородностей разреза. Поэтому кажущиеся сопротивления более сложным образом зависят от удельного сопротивления пластов, тесная линейная зависимость которых на кривых КС четырехэлектродного зонда подтверждает возможность применения для количественной интерпретации приближенной методики, основанной на использовании коэффициента анизотропии толщи пород, охватываемых измерительной установкой.

Решение обратной задачи для вычисленной на ЭВМ эталонной диаграммы КС осуществлялось с помощью описанного выше алгоритма. При этом определение удельного сопротивления, полученного в результате интерпретации, производилось по формуле $\rho_{\Pi}^* = \rho_K \lambda$.

Для определения степени влияния на ρ_K различных факторов ρ_{Π}^* вычислялось два раза. В первый раз использовалось кажущееся сопротивление ρ_{Kh} , считанное в центре пластов с эталонной диаграммы и исправленное только за влияние мощности пласта, причем коэффициент анизотропии λ_{Kh} вычислялся с помощью тех же значений ρ_{Kh} . Найденное удельное сопротивление обозначалось ρ'_{Π} . Во второй раз удельное сопротивление определялось с использованием уже вычисленного коэффициента анизотропии λ_{Kh} и кажущегося сопротивления $\rho_{K,\text{исп}}$, исправленного, помимо мощности, за влияние экранирования пластами, расположенными в районе питающих электродов. Обозначалось оно ρ''_{Π} . Для оценки погрешности интерпретации в обоих случаях по формуле

$$\varepsilon = (\rho_{\Pi} - \rho_{\Pi}^*) / \rho_{\Pi} \quad (78)$$

вычислялись относительные ошибки определения удельного электрического сопротивления. Все исходные данные, а также результаты обработки сведены в табл. 8. В табл. 9 приведено, кроме того, распределение относительных ошибок определения значений ρ_{Π}^* , полученных указанными выше способами.

Из анализа таблиц следует, что даже при интерпретации кривой кажущегося сопротивления без учета влияния экранирования относительные ошибки определения удельного сопротивления укладываются в диапазон до 64 %, причем ошибки величиной до 50 % имеет большинство пластов (33 пласта из 39). При учете влияния экранирования относительные ошибки определения ρ'_{Π} для подавляющего большинства пластов лежат в пределах до 40, а максимальная величина ошибки не превышает 49 %.

Для сравнения величин ошибок интерпретации диаграмм четырехэлектродных зондов с ошибками, получаемыми с помощью других методов электротометрии, воспользуемся данными, опубликованными в

Результаты обработки эталонного разреза

Номер пласта	h, м	$\rho_{\text{п}}$ Ом·м	$\rho_{\text{к}}$ Ом·м	$\rho_{\text{вм}}$ Ом·м	$\rho_{\text{к}} h$, Ом·м	$\lambda_{\text{к}} h$	$\rho'_{\text{п}}$ Ом·м	ε_1	$\rho_{\text{к.иср}}$ Ом·м	$\rho'_{\text{п}}$ Ом·м	ε_2
1	∞	22	18	2	18	1,536	27,7	-0,26	18	27,7	-0,26
2	1,4	2	2	11,4	1,6	1,681	2,7	-0,35	1,6	2,7	-0,35
3	1,6	6	4,8	2,5	4,8	1,675	8,0	-0,34	4,8	8,0	-0,34
4	2,8	4	3	21,7	2,5	1,674	4,2	-0,05	2,5	4,2	-0,05
5	1,6	80	38,6	2,5	47	1,681	79,0	0,01	47	79,0	0,01
6	0,8	1	2	22,3	0,5	1,683	0,8	0,16	0,5	0,8	0,16
7	2,4	15	6	2,8	6,1	1,677	10,2	0,32	6,1	10,2	0,32
8	0,8	3	3,6	20,7	1,9	1,675	3,2	-0,06	1,9	3,2	-0,06
9	3,6	125	35,5	9	36	1,678	60,4	0,52	49,0	82,2	0,34
10	3,2	37	14,3	18,2	14	1,734	24,3	0,34	14,0	24,3	0,34
11	1,6	2	0,9	13	0,8	1,908	1,5	0,24	1,3	2,5	-0,24
12	3,2	43	11,8	5,3	11,5	1,904	21,9	0,49	16,8	32,0	0,26
13	4,0	35	9,6	13,9	9,6	1,866	17,9	0,49	17,2	32,1	0,08
14	2,0	60	15,9	15,7	15,9	1,881	29,9	0,50	24,5	46,1	0,23
15	3,6	90	21,7	12	21,7	1,911	41,5	0,54	39,7	75,9	0,16
16	2,6	31	8	12,9	7	1,853	13,9	0,58	10,9	20,2	0,35
17	3,4	15	4	5,5	3,9	1,880	7,3	0,51	6,2	11,7	0,22
18	2,0	6	3	18,5	2	1,882	3,6	0,39	2,0	3,6	0,39
19	1,6	110	33	1,9	38	1,812	68,9	0,37	65,0	117,7	-0,07
20	2,0	2	0,8	18,8	0,7	1,868	1,2	0,40	1,0	1,9	0,06
21	6,0	14	4,5	1,5	4,5	2,138	9,6	0,31	8,1	17,3	-0,23
22	4,8	6	2,1	19,8	2	2,280	4,6	0,24	3,3	7,6	-0,26
23	4,8	140	35	2,3	36	2,218	79,8	0,43	45,7	101,4	0,28
24	3,6	7	2,4	28,5	2,1	2,321	4,9	0,30	3,1	7,2	-0,03
25	2,0	110	22	9,2	19	2,315	44,0	0,60	31,7	73,5	0,33

26	2,0	50	15,9	11,3	12	2,289	27,5	0,45	14,4	33,0	0,34
27	6,8	1	0,5	12,8	0,5	2,247	1,1	-0,12	0,5	1,1	-0,12
28	2,4	16	9,6	2,9	10	2,294	22,9	-0,43	7,9	18,1	-0,13
29	3,2	9	5,25	14,8	5,1	2,637	13,4	-0,49	5,1	13,4	-0,49
30	6,8	43	20	4,9	20	2,816	56,3	-0,31	13,5	38,0	0,12
31	3,6	10	4,6	11,9	4,5	2,804	12,6	0,26	4,5	12,6	0,26
32	1,2	5	3,7	22,2	1,2	2,843	3,3	0,33	2,0	5,7	-0,14
33	0,8	150	39,8	8,4	58	2,864	166,1	-0,11	58,0	166,1	-0,11
34	0,6	8	13,1	26,9	1,5	2,838	4,3	0,47	2,3	6,6	0,17
35	1,8	33	13,9	7,9	14,7	2,682	39,4	-0,19	14,7	39,4	-0,19
36	5,8	5	2,6	46,75	2,6	2,121	5,5	-0,10	2,6	5,5	-0,10
37	5,2	140	79,6	12,9	86,5	1,795	155,3	-0,11	86,5	155,3	-0,11
38	6,4	80	23,1	55	22	2,163	47,6	0,41	29,7	64,2	-0,20
39	2,8	200	30,4	16,2	30	2,408	72,2	0,64	70,2	169,0	0,16
40	5,6	35	9,2	17,6	9	-	-	-	-	-	-
41	6,8	17	4,8	66,6	4,8	-	-	-	-	-	-
42	8,8	450	124	17	135	-	-	-	-	-	-

Таблица 9

Распределение относительных ошибок определения ρ_{Π} по результатам интерпретации

Диапазон изменения относительной ошибки, %	Четырехэлектродные градиент-зоны				БЭЗ			
	ρ_{Π}		ρ_{Π}''		Ручная интерпретация		ЭВМ	
	число пластов	(%)	число пластов	(%)	число пластов	(%)	число пластов	(%)
0-10	4	(10,26)	8	(20,51)	3	(20,0)	1	(14,28)
10-20	5	(12,82)	12	(30,77)	1	(6,67)	1	(14,28)
20-30	5	(12,82)	9	(23,08)	3	(20,0)	1	(14,28)
30-40	10	(25,64)	9	(23,08)	-	-	-	-
40-50	9	(23,08)	1	(2,56)	-	-	1	(14,28)
50-60	5	(12,82)	-	-	-	-	-	-
60-70	1	(2,56)	-	-	-	-	1	(14,28)
70-80	-	-	-	-	2	(13,33)	1	(14,28)
80-90	-	-	-	-	1	(6,67)	-	-
90-100	-	-	-	-	1	(6,67)	1	(14,28)
100	-	-	-	-	4	(26,66)	-	-

работе [31], в которой приведены результаты количественной интерпретации БЭЗ по 21 пласту одной из скважин Западной Сибири. Обработка каждого пласта выполнялась 25 интерпретаторами, экспертом-геофизиком, результаты интерпретации которого были приняты за наиболее достоверные оценки удельного электрического сопротивления, и на ЭВМ с помощью комплекса программ „Самотлор-Ц2”.

Из общего числа помещенных в работе [31] данных были использованы материалы по 15 пластам, которые имели экспертную оценку удельного сопротивления. Погрешность интерпретации оценивалась путем вычисления относительной ошибки определения ρ_{Π}^* по формуле (78), в которой в качестве ρ_{Π} использовалась экспертная оценка удельного электрического сопротивления, а в качестве ρ_{Π}^* — удельное сопротивление, полученное в результате ручной интерпретации или на ЭВМ. Относительная ошибка вычислялась для среднего $\rho_{\Pi, \text{ср}}$ и крайних $\rho_{\Pi, \text{руч}}$ значений удельных сопротивлений, определенных в результате ручной интерпретации разными интерпретаторами, а также для ρ_{Π} ЭВМ, полученного с помощью ЭВМ. Все указанные данные сведены в табл. 9, 10.

Из табл. 10 прежде всего следует, что разрез, использованный при интерпретации БЭЗ, значительно проще, чем эталонный разрез, использованный при интерпретации диаграммы четырехэлектродного зонда; экспертная оценка сопротивлений пластов, принимаемая за истинное удельное сопротивление, колеблется от 1,8 до 8 Ом-м и лишь один пласт имеет повышенное (до 38 Ом-м) сопротивление. В то же время в первом случае удельные сопротивления пластов в разрезе изменяют-

Таблица 10

Результаты обработки материалов БЭЗ (по данным [31])

h, м	Экспертная оценка $\rho_{П}$, Ом·м	Ручная интерпретация*			Комплекс „Самоглор-П2”	
		$\rho_{П,ручн}$, Ом·м	Относительная ошибка опре- деления $\rho_{П,ручн}$, %	Число отказов	$\rho_{П}$ ЭВМ, Ом·м	Относительная ошибка опреде- ления $\rho_{П}$ ЭВМ, %
3,6	6,5	4,6–10	29,2–53,8	—	5,5; 6,1	15,4; 6,2
		7,3	12,3			
6,0	8	5,7–19,2	28,7–140	—	12	50
		14,7	83,7			
1,2	5	3,1–6,3	38–26	6	—	—
		4,8	4			
1,6	6,5	3,8–6,2	41,5–4,6	5	4,6	29,2
		4,9	24,6			
1,4	3,8	2,3–8	39,5–52,5	6	—	—
		4,6	21			
3,2	2	2–6,6	0–230	2	3,4	70
		4,4	120			
8,8	1,8	1,7–9,4	5,5–422	3	—	—
		3,9	116,7			
5,4	2	2–9,3	0–365	3	3,5	75
		3,9	95			
3,2	3,4	2,3–6	32,3–76,5	3	—	—
		4,1	20,6			
5,2	2,8	2–12	28,6–328	2	—	—
		4,9	75			
5,6	3	2,4–12,3	20–310	2	—	—
		5,2	73,3			
6	2	2–11	0–450	3	—	—
		4,5	125			

Продолжение табл. 10

h, м	Экспертная оценка $\rho_{п.}$ Ом·м	Ручная интерпретация*			Комплекс „Самолор-П2”	
		$\rho_{п.ручн.}$ Ом·м	Относительная ошибка определения $\rho_{п.ручн.}$ %	Число отказов	$\rho_{п.}$ ЭВМ, Ом·м	Относительная ошибка определения $\rho_{п.}$ ЭВМ, %
5,8	38	26,5–40	30,3–5,3	—	35, 36, 23	7,9; 5,3; 39,5
		35,9	5,5			
4,4	2,5	2,8–17	12–580	1	4,9	96
		9,6	284			
1,4	7,5	4,4–10,8	41,3–44	6	—	—
		7,2	4			

* В числителе — диапазон вычисляемой величины, в знаменателе — ее среднее значение.

ся, как отмечалось, от 1 до 450 Ом·м, а число пластов высокого сопротивления достигает 10. Мощности пластов в обоих разрезах варьируют примерно в одинаковых пределах, хотя и в этом отношении второй разрез более благоприятен; в первом минимальная мощность составляет всего 0,6 м, а во втором — втрое больше (1,8 м).

Максимальные относительные ошибки, полученные при ручной интерпретации кривых БЭЗ, более чем в половине пластов превышают 100 %, достигая в некоторых из них 422–580 %. Кроме того, даже при использовании среднего значения $\rho_{п.ср}$ по результатам определений большим числом интерпретаторов (не менее 22) относительная ошибка более половины всех пластов (хотя и снижается) составляет 73,3 – 284 %, тогда как относительная ошибка интерпретации диаграммы четырехэлектродного зонда даже без учета влияния экранирования для всех пластов лежит в пределах до 64 %. При обработке материалов БЭЗ на ЭВМ из 15 пластов (см. табл. 10) в 8 случаях машина дала „отказ”, а в трех из семи оставшихся относительная ошибка определения $\rho_{п.}$ ЭВМ по сравнению с экспертными оценками составила 70–96 %.

Таким образом, количественная интерпретация даже такого разработанного в теоретическом отношении метода, как БЭЗ, в условиях произвольного переслаивания пластов разного сопротивления ограниченной мощности дает ошибки, примерно в 50 % случаев превышающие погрешности определения $\rho_{п.}$ при использовании приближенной методики интерпретации диаграмм четырехэлектродных градиент-зондов. Это дает основание считать, что применение метода

четырёхэлектродных градиент-зондов на достигнутом в настоящее время уровне разработки теории интерпретации его данных вполне оправдано.

§ 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА НАСЫЩЕНИЯ КОЛЛЕКТОРОВ

Основным преимуществом четырёхэлектродных градиент-зондов большого размера является большая, по сравнению с другими методами электрометрии, глубинность исследования при сохранении высокой расчленяющей способности разреза по сопротивлениям. Это предопределяет использование их для определения характера насыщения коллекторов при наличии глубокого проникновения промысловой жидкости. Однако сами коллекторы в разрезе четырёхэлектродными градиент-зондами большого размера в общем случае выделяться не могут. Поэтому интерпретация получаемых с их помощью материалов должна проводиться совместно с диаграммами тех методов ГИС, которые несут информацию о коллекторских свойствах пород.

Методика выделения коллекторов в разрезах разного типа разработана достаточно полно [1, 12, 25]. Поэтому останавливаться на этом вопросе не будем. Отметим лишь, что наиболее информативными с этой точки зрения являются ядерно-магнитный, гамма-гамма-, акустический, нейтронный методы, ПС, микрозонды и кавернометрия, а также методики динамического (повторных замеров и двух растворов) обнаружения коллекторов.

Что касается возможности выделения коллекторов в разрезе по диаграммам четырёхэлектродных зондов, то она основана на сравнении показаний методов электрометрии, обладающих небольшой глубинностью исследования (например, бокового), с диаграммами КС четырёхэлектродных градиент-зондов и применима в основном для неоднородных (в частности, карбонатных) коллекторов относительно большой мощности. В силу неоднородности по фильтрационным свойствам в прослоях такого коллектора, обладающих разной проницаемостью, зачастую образуются зоны проникновения разного диаметра. Поэтому малоглубинные методы электрометрии с хорошей разрешающей способностью по вертикали, захватывая при измерениях в одних случаях часть пласта, заполненную преимущественно фильтратом, а в других – пластовой водой, будут регистрировать изрезанную кривую КС. В то же время четырёхэлектродные градиент-зонды большого размера, имеющие большую глубинность исследования и также обладающие высокой дифференцирующей способностью, отмечают такие пласты плавной кривой КС, поскольку изменения диаметра зоны проникновения в разных прослоях коллектора на их показаниях

сказываются значительно меньше. Особенно наглядно этот признак проявляется в водоносных коллекторах, в которых, в силу их большой фазовой проницаемости к фильтрату, образуются более глубокие зоны проникновения. Однако он не является достаточным для однозначного определения коллектора и может быть использован лишь как дополнительный.

Определение характера насыщения коллекторов основано на определении сопротивления неизменной проницаемостью промывочной жидкости породы и сопоставлении его с сопротивлением той же породы при 100 %-й ее водонасыщенности. Основное затруднение при оценке характера насыщения коллекторов возникает в случае образования в них глубоких зон проникновения фильтрата промывочной жидкости, что может быть как в межзерновых, так и особенно в коллекторах со сложной (трещинной, трещинно-поровой, каверново-трещинной) структурой порового пространства. Особенно часто это наблюдается при вскрытии продуктивных отложений на ЕВС и ПАВ, больших репрессиях на пласты-коллекторы, а также при проведении геофизических исследований в скважинах с большой (свыше 4000 м) глубиной.

Согласно опубликованным данным [7, 9, 10, 11, 26, 36, 38, 40, 45], радиус зоны проникновения может достигать величины 2–4 м и более. Однако большая часть исследователей указывает в качестве наиболее вероятных максимальных радиусов зоны проникновения величины, не превышающие 1,6–2 м. Тем не менее, и такие зоны проникновения ($D/d_c = 16 \div 20$) оказываются слишком глубокими для того, чтобы имеющимися методами электротметрии можно было получить надежную информацию о сопротивлении неизменной части пласта-коллектора.

Методика качественного определения характера насыщения коллекторов с помощью диаграмм КС, зарегистрированных четырехэлектродными градиент-зондами, заключается в сопоставлении их с диаграммами малоглубинных методов электротметрии в интервалах залегания коллекторов, выделенных методами определения пористости. Если малоглубинные методы характеризуются в указанных интервалах низкими показаниями, а на диаграммах четырехэлектродных градиент-зондов отмечаются высокие сопротивления, то при низком удельном сопротивлении пластовых вод это однозначно свидетельствует об их нефтенасыщенности. Возможность спутать нефтенасыщенность таких пластов с загипсованностью отпадает, так как в последнем случае малоглубинные методы электротметрии также отмечали бы повышенные сопротивления.

С увеличением размера четырехэлектродных зондов ρ_K против пластов высокого сопротивления, как правило, растет, что связано с известной для одиночных пластов высокого сопротивления законо-

мерностью увеличения ρ_k с ростом L/h (см. рис. 28). В то же время при увеличении размера зонда увеличивается объем среды, влияющей на создаваемое им электрическое поле, что в случае слоистого разреза приводит к росту коэффициента анизотропии и, следовательно, уменьшению регистрируемого значения ρ_k . Поскольку без проведения количественной интерпретации установить долю влияния двух указанных факторов не представляется возможным, то соотношение величин кажущихся сопротивлений, регистрируемых четырехэлектродными градиент-зондами разного размера, не может являться диагностическим признаком для установления наличия проникновения промывочной жидкости в пласт-коллектор. Иногда на диаграммах четырехэлектродных градиент-зондов разного размера наблюдаются почти одинаковые кажущиеся сопротивления, а иногда численное значение ρ_k на одном из зондов вообще выпадает из какой-либо закономерности. Последнее чаще всего объясняется влиянием экранирования пластами, расположенными за пределами зонда.

Для качественного выявления экранирования полезно иметь специальную линейку с нанесенными на ней в масштабе глубин диаграмм (обычно 1:200) положениями точки записи и токовых электродов четырехэлектродного градиент-зонда. Совмещая точку записи зонда на этой линейке с изучаемым пластом на рассматриваемой диаграмме, по положению токовых электродов относительно пластов высокого сопротивления можно установить наличие экранирования и его характер.

В случае неглубокого понижающего или повышающего проникновения промывочной жидкости в нефтенасыщенные пласты относительно малоглубинные методы электрометрии, как и методы с большой глубиной исследования, дают высокие показания. Поскольку такую же характеристику имеют непроницаемые пласты, а также битумонасыщенные коллекторы, то в этих случаях необходимо, прежде всего, убедиться в том, что исследуемый пласт действительно является коллектором и обладает эффективной пористостью, что наиболее надежно может быть определено по показаниям ядерно-магнитного метода. Установить характер насыщения коллекторов с помощью четырехэлектродных градиент-зондов большого размера в таких случаях можно путем вычисления параметра насыщения $P_H = \rho_{н.п} / \rho_{в.п}$ и сопоставления его с критическим для данной площади или месторождения значением этой величины. При этом в качестве удельного сопротивления нефтенасыщенного пласта $\rho_{н.п}$ можно, в первом приближении, воспользоваться кажущимся сопротивлением, считанным против исследуемого пласта с диаграммы, зарегистрированной наибольшим по размеру четырехэлектродным зондом, а удельное сопротивление водонасыщенного коллектора определяется расчетным путем по известному удельному сопротивлению пластовых вод,

коэффициенту пористости и функциональной зависимости между ним и параметром пористости.

Поскольку в качестве $\rho_{н.п}$ чаще всего используется кажущееся сопротивление, считанное непосредственно с диаграммы, зарегистрированной четырехэлектродным градиент-зондом большого размера, определенный таким образом параметр насыщения целесообразно называть кажущимся параметром насыщения $P_{н.к}$. При величине $P_{н.к} > 2 \div 3$ пласт-коллектор является нефтенасыщенным. Это тем более справедливо, так как ρ_k пластов высокого сопротивления всегда меньше ρ_n . Поэтому при $P_{н.к} > 2 \div 3$ удельное сопротивление нефтенасыщенного пласта будет превышать удельное сопротивление полностью водонасыщенного пласта еще в большее число раз. Для определения продуктивности пласта величину истинного или кажущегося параметра насыщения необходимо, как это рекомендуется соответствующими методиками, сопоставлять с критическим значением этого параметра, установленным по результатам испытаний.

Водонасыщенные коллекторы при наличии в них глубоких зон повышающего проникновения, изучаемые малоглубинными методами, часто характеризуются повышенными кажущимися сопротивлениями, создающими ложное впечатление об их нефтенасыщении. Четырехэлектродными градиент-зондами большого размера такие пласты при высокой пористости отмечаются низкими кажущимися сопротивлениями, по порядку величины соизмеримыми с удельными сопротивлениями полностью водонасыщенных коллекторов. Поэтому установить характер насыщения таких коллекторов, как правило, не составляет труда.

При низких значениях коэффициента пористости водонасыщенные пласты-коллекторы и на диаграммах четырехэлектродных градиент-зондов большого размера характеризуются повышенными кажущимися сопротивлениями. В этом случае при определении характера их насыщения может оказать помощь сопоставление диаграмм КС и НГМ; повышенные показания тех и других свидетельствуют о наличии уплотненных малопористых пород.

Глава VI

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ В СКВАЖИНАХ ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНЫМИ ГРАДИЕНТ-ЗОНДАМИ БОЛЬШОГО РАЗМЕРА

§ 1. УСЛОВИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К АППАРАТУРЕ

Основной частью установки для исследования скважин четырехэлектродными градиент-зондами большого размера, определяющей геологическую эффективность этого метода, является зонд. При этом для достижения наибольшей глубинности исследования и близости регистрируемых кажущихся сопротивлений к асимптотическим необходимо использовать максимально возможные по техническим соображениям расстояния между токовыми электродами. Однако использование зондов очень большого размера ограничивается факторами, основными из которых являются:

наличие интервала, примыкающего к забою скважины и равного размеру зонда, на котором кривая КС не может быть зарегистрирована из-за того, что точка записи зонда расположена посередине между токовыми электродами;

ограниченная высота буровой вышки, что затрудняет спуско-подъемные операции при использовании зондов очень большого размера;

резкое снижение полезного сигнала между измерительными электродами при реально достижимых значениях силы тока в цепи электродов АВ.

Исходя из этого, был выбран максимальный размер четырехэлектродного зонда $L = 25$ м.

Поскольку было установлено, что пласты высокого сопротивления, соизмеримые по мощности с удвоенным размером четырехэлектродного зонда, подвержены сильному экранированию, а в разрезе скважин могут присутствовать пласты разной мощности, измерения желательно проводить не одним, а несколькими зондами разного размера. В связи с этим при разработке аппаратуры была предусмотрена возможность измерений, помимо основного зонда ($L = 25$ м), зондами с L , равными 16 и 8 м.

Все три зонда составляют ряд, смыкающийся с наибольшим из зондов комплекта БЭЗ, что, в частности, позволяет сравнивать результаты скважинных измерений трех- и четырехэлектродными градиент-зондами одинакового размера.

Расстояние между измерительными электродами зонда для обеспечения высокой дифференциации разрезов, сложенных пластами

малой мощности, следует брать минимально допустимое, например 0,5 м.

Использование зондов с большими разносами AB и малым расстоянием между измерительными электродами приводит к резкому уменьшению измеряемого сигнала. Расчеты показывают, что при удельном сопротивлении среды $\rho_{\Pi} = 1$ Ом·м, $AB = 50$ м и силе тока в питающей цепи $I = 0,5$ А разность потенциалов, возникающая на измерительных электродах, разнесенных на расстояние $MN = 0,5$ м, будет равна всего 60,7 мкВ. Отсюда следует первое требование, предъявляемое к аппаратуре, предназначенной для измерений в скважинах четырехэлектродными градиент-зондами большого размера: она должна содержать усилитель, расположенный в скважинном приборе вблизи измерительных электродов.

Наиболее стабильно работают усилители переменного напряжения, которые и надо применять для повышения надежности измерения полезных сигналов, возникающих на электродах MN . Следовательно, электрическое поле, возбуждаемое токовыми электродами в окружающей зонд среде, также должно быть переменным. Использование в питающей цепи переменного тока позволяет избавиться от влияния постоянных или медленно меняющихся разностей потенциалов ПС. Из этого следует второе требование к аппаратуре – наличие генератора переменного тока.

При питании токовых электродов зонда переменным током от генератора, расположенного на поверхности, в измерительных жилах кабеля вследствие несимметричного расположения его жил возникают ЭДС индукции, которые могут оказаться больше величины полезного сигнала. К тому же амплитуда этих ЭДС будет меняться по мере смотки кабеля на лебедку подъемника. Поэтому при использовании для передачи полезного сигнала на поверхность системы интенсивности сигнал невозможно было бы отделить от индуктивных помех той же частоты.

С целью исключения в приемных жилах кабеля ЭДС индукции генератор токовой цепи необходимо поместить в скважинный прибор, а питание на него подавать с поверхности в виде постоянного тока. Тогда по всей длине кабеля в двух его жилах будет циркулировать лишь постоянный ток, не создающий в приемных жилах ЭДС индукции. Кроме того, в этом случае относительно просто (по величине тока через кабель) осуществляется контроль за стабильностью режима работы скважинного прибора.

Очень важным при определении параметров аппаратуры, предназначенной для измерений в скважинах четырехэлектродными градиент-зондами большого размера, является вопрос о выборе частоты возбуж-

даемого в породах электрического поля¹. При использовании в цепи питания трехэлектродного градиент-зонда с $L = 8$ м тока частотой 300 Гц в интервалах разреза с низкими сопротивлениями в измерительных жилах зонда на участке между электродами образуются ЭДС индукции, которые могут превышать уровень полезного сигнала. Причем амплитуда этих ЭДС меняется по разрезу в зависимости от удельного сопротивления и мощности пластов, диаметра скважины и сопротивления промывочной жидкости, а также удельного сопротивления вмещающих пород. Поэтому для возбуждения электрического поля разнесенными на большое расстояние электродами АВ четырехэлектродного градиент-зонда необходимо применять ток питания малой частоты. Выбор для цепи питания тока низкой частоты обусловлен также тем, что характер распределения в пространстве создаваемого им поля сравнительно мало отличается от поля постоянного тока, вследствие чего оно мало искажено влиянием скин-эффекта. Немаловажно, кроме того, что теория методов кажущегося сопротивления разработана именно для постоянного тока.

Поскольку, как отмечалось выше, амплитуда полезного сигнала при измерениях четырехэлектродными градиент-зондами большого размера мала, необходимо иметь возможность выделять его на фоне значительных по величине помех. Это можно осуществить применением в усилителе измерительного канала частотной фильтрации, для чего частота полезного сигнала должна отличаться от частотного спектра помех.

Ю.И. Булгаковым и А.В. Вешевым (1962 г.) было установлено, что частотный спектр промышленных помех имеет минимум в диапазоне 17–23 Гц. Следовательно, для наиболее эффективного подавления промышленных помех в цепи питания электродов АВ четырехэлектродных градиент-зондов желательно использовать частоту порядка 20 Гц.

Наряду с полезным сигналом и помехами промышленной частоты на измерительных электродах зонда в скважине образуется разность потенциалов $\Delta U_{ПСМН}$, обусловленная собственной поляризацией пород. Последняя осложняет измерение кажущегося сопротивления при высоких скоростях регистрации, особенно при использовании в цепи питания электродов АВ низких частот. Это объясняется тем, что при увеличении скорости регистрации частотный спектр разностей потенциалов ПС смещается в область более высоких частот и его гармоники попадают в полосу пропускания измерительного канала.

¹Барминский А.Г., Колесников В.Н. Об измерении сопротивления в низкоомных разрезах зондами с большими коэффициентами//Разведочная геофизика. — М.: Недра, 1966. — Вып. 17. — С. 82–89.

Амплитуда градиента потенциала ПС по оценкам, сделанным на основании анализа реальных кривых ПС, записанных в скважинах, может достигать ± 75 мВ. В то же время полезный сигнал $\Delta U_{КС MN}$ на измерительных электродах при $AB = 50$ м и токе питания $I_{AB} = 0,5$ А в среде с удельным сопротивлением $\rho = 1$ Ом·м будет составлять всего 63,7 мкВ. Следовательно, превышение разности потенциалов ПС над разностью потенциалов КС будет $\Delta U_{ПС MN} / \Delta U_{КС MN} = 1177 \approx 60$ дБ. Если принять за нижний предел измерения ρ_K величину 1 Ом·м, то для того, чтобы погрешность, обусловленная градиентом потенциала ПС, не превышала 10 %, амплитуду последнего в измерительном канале необходимо подавить не менее чем на 80 дБ.

По мнению большинства исследователей спектр частот потенциалов ПС в зависимости от мощности пластов, их чередования и скорости регистрации не превышает 1 Гц. Однако частота изменения градиента потенциала ПС по сравнению с потенциалом ПС будет, очевидно, иметь несколько большую величину в связи с тем, что в процессе перемещения зонда по стволу скважины одновременно изменяются потенциалы естественной поляризации обоих электродов. Об этом, в частности, свидетельствует более изрезанная, по сравнению с кривой ПС, кривая $\Delta U_{ПС MN}$ (рис. 50). Поэтому срез амплитудно-частотной характеристики измерительного канала необходимо обеспечить на частотах, максимально приближенных к рабочей частоте.

Огромное значение для обеспечения точности регистрации кривых КС имеет стабильность тока генератора цепи AB , которая зависит от постоянства сопротивления его нагрузки.

Нагрузкой генератора является сопротивление R_{AB} , включенное между токовыми электродами зонда, которое в процессе перемещения последнего по стволу скважины может изменяться. В связи с этим определим возможные пределы изменения R_{AB} расчетным путем.

Как известно [15], полное сопротивление заземления в скважине (в общем случае)

$$Z_a = Z_0 + Z_K, \quad (79)$$

где Z_0 — сопротивление среды, прилегающей к скважине, а Z_K — контактное сопротивление.

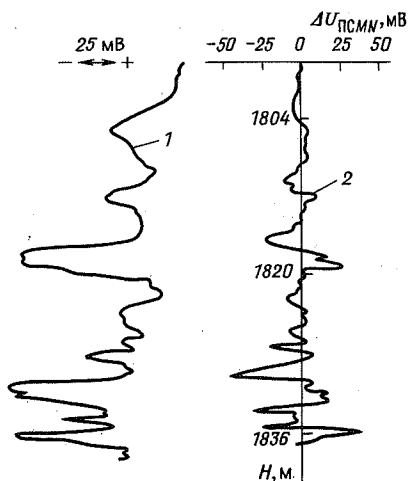
Для переменного тока низкой частоты реактивными составляющими сопротивлений Z в формуле (79) можно пренебречь. Тогда получим

$$Z_a \approx R_a = R_0 + R_K, \quad (80)$$

где R_a , R_0 , R_K — активные составляющие сопротивлений Z_a , Z_0 и Z_K соответственно.

Контактное сопротивление определяется выражением [15]:

Рис. 50. Кривая ПС (1) и построенная по ней кривая градиента ПС (2) ($MN = 0,5 \text{ м}$)



$$R_K = r_K / S_K,$$

где r_K — контактное сопротивление единицы поверхности заземления, а S_K — площадь поверхности заземления.

Величина r_K зависит от материала заземления, состояния его поверхности, плотности и частоты тока, проходящего через заземление, температуры и сопротивления окружающей среды и т.д. Поэтому вычисление r аналитически является сложной задачей. С достаточной для практических целей точностью оценить величину r_K позволяют экспериментальные кривые, устанавливающие зависимость контактного сопротивления некоторых металлов от температуры, частоты и силы тока, влияние которых преобладает. Например, для свинца при удельном сопротивлении окружающей среды $2,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, температуре 20°C , частоте тока $7,2 \text{ Гц}$ и плотности тока $0,41 \text{ МА/см}^2$ $r_K \approx 1200 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ и падает с ростом температуры, частоты и плотности тока.

Допустим, что при исследовании скважин четырехэлектродными градиент-зондами большого размера электрическое поле в породе возбуждается с помощью свинцовых электродов площадью около 50 см^2 , переменным током 500 МА частотой 20 Гц при температуре и удельном сопротивлении промывочной жидкости выше 20°C и ниже $2,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ соответственно. Тогда контактное сопротивление $R_K \leq 24 \text{ Ом}$.

Для оценки сопротивления R_0 воспользуемся приближенной зависимостью для определения эффективного сопротивления среды ($\rho_{\text{эф}}$), прилегающей к сферическому электроду, находящемуся в скважине против пласта бесконечной мощности [15]:

$$R_0 = \frac{\rho_{\text{эф}}}{2\pi d_3} = \frac{\rho_c}{2\pi d_3} \left[1 + \frac{d_3}{d_c} \left(\frac{\pi}{2} \frac{\rho_{\text{П}}/\rho_c}{\sqrt{(\rho_{\text{П}}/2\rho_c) + 1}} - 1 \right) \right], \quad (81)$$

где ρ_c — удельное сопротивление промывочной жидкости, ρ_{Π} — удельное сопротивление пород, d_c и d_3 — диаметры скважины и электрода соответственно.

После преобразования формулы (81) получим

$$R_0 = \frac{\rho_c}{2\pi} \frac{d_c - d_3}{d_c d_3} + \frac{1}{4} \frac{\rho_{\Pi} \sqrt{2\rho_c}}{d_c \sqrt{\rho_{\Pi} + 2\rho_c}}. \quad (82)$$

Из этого выражения следует, что величина R_0 монотонно возрастает с увеличением ρ_c и ρ_{Π} и достигает максимума при $\rho_c = \rho_{c \max}$ и $\rho_{\Pi} = \rho_{\Pi \max}$.

Величина удельного сопротивления промывочной жидкости в скважинах в подавляющем большинстве случаев не превышает 2,5 Ом·м, а предельное значение ρ_{Π} можно принять равным 1000 Ом·м. Диаметр d_3 сферического электрода, имеющего поверхность 50 см², равен примерно 4 см, а глубокие скважины в настоящее время бурятся преимущественно диаметром 0,2 м. Тогда, подставляя в формулу (82) $\rho_{\Pi} = 1000$ Ом·м, $\rho_c = 2,5$ Ом·м, $d_c = 0,2$ м и $d_3 = 0,04$ м, получим $R_{0 \max} = 98,12$ Ом, а полное сопротивление заземления A в соответствии с формулой (80)

$$R_A \max = 98,12 + 24 = 122,12 \text{ (Ом)}.$$

Так как при электрометрии скважин четырехэлектродными градиент-зондами электрическое поле в породах создается двумя токовыми электродами, то сопротивление между ними будет, очевидно, равно сумме сопротивлений заземлений A и B , т.е.

$$R_{AB \max} = R_A \max + R_B \max = 244,24 \text{ Ом}.$$

Расчет R_0 по формуле (82) не является абсолютно точным и при $\rho_{\Pi}/\rho_c > 15$ дает несколько заниженные значения [15]. Кроме того, электроды, применяемые на практике, не являются сферическими, а обычно представляют собой свинцовые полоски, которыми обвит кабель зонда. Поэтому поверхность их, обращенная к окружающей среде, уменьшается, что, по-видимому, также несколько увеличивает их сопротивление по сравнению с вычисленным по формуле (82). Учитывая все это, диапазон изменения сопротивления R_{AB} , в пределах которого сила тока в питающей цепи четырехэлектродного зонда должна оставаться постоянной, следует установить от 0 до 300 Ом.

Обеспечить стабилизацию тока на сопротивлении R_{AB} , изменяющемся в таких широких пределах, можно как за счет уменьшения тока в цепи AB , так и за счет увеличения мощности питающего ее генератора тока. Однако снижение силы тока в цепи AB весьма нежелательно, так как это повлечет за собой уменьшение величины полезного

сигнала КС на измерительных электродах, что еще больше затруднит его измерение. Поэтому более целесообразным является увеличение мощности генератора тока питающей цепи.

Так как генератор тока для исключения индуктивных наводок в жилах кабеля должен быть размещен в скважинном приборе, то увеличение его мощности приведет к соответствующему увеличению рассеиваемой в скважинном приборе энергии, что, в свою очередь, может вызвать нарушение теплового режима его электронной схемы.

С целью уменьшения энергии, рассеиваемой генератором АВ в скважинном приборе, форма сигнала генерируемого им тока должна быть не синусоидальной, а прямоугольной. В этом случае генератор будет работать в режиме переключений, что позволит резко повысить коэффициент использования транзисторов и значительно проще решить вопрос о температурной стабилизации электронной схемы скважинного прибора.

Поскольку питание генератора АВ должно осуществляться постоянным током, то полезный сигнал, поступающий с измерительных электродов и усиленный скважинным усилителем, может передаваться на поверхность по свободным жилам кабеля в виде модулированного по амплитуде напряжения рабочей частоты. Это позволяет существенно упростить передающую часть электронной схемы скважинного прибора и, кроме того, использовать те же жилы кабеля для передачи служебных сигналов. При этом в связи с использованием в цепи АВ тока низкой частоты непостоянство параметров линии связи, обусловленное индуктивностью и емкостью жил кабеля, будет сказываться незначительно.

Одним из требований, предъявляемых к скважинным телеизмерительным системам, является обеспечение возможно большего рабочего диапазона измерений, т.е. диапазона измеряемых величин, в котором относительная погрешность δ не превышает заданного значения [30]. В обычно применяемых при промыслово-геофизических исследованиях фоторегистраторах он определяется погрешностью установки блика самого чувствительного гальванометра ($\delta = 2$ мм) и максимально допустимым, согласно техническим условиям, отклонением блика гальванометра масштаба 1:25, составляющим 10 см. Таким образом, рабочий диапазон фоторегистратора $D_{\phi} = 100 \cdot 25 / 2 = 1250$, что составляет 62 дБ.

Очевидно, что наилучшей будет такая скважинная телеизмерительная система, которая обеспечивает рабочий диапазон, равный или превышающий D_{ϕ} при той же относительной погрешности измерения. В этом случае в измерительном канале можно обойтись без устройства, позволяющего переключать пределы измерения, что существенно упростит схему скважинного прибора.

Следует отметить еще одно обстоятельство. Поскольку магнито-

электрические гальванометры, установленные в фоторегистраторах, являются приборами постоянного тока, а полезный сигнал из скважинного прибора поступает в виде амплитудно-модулированного напряжения низкой частоты, в поверхностной панели должно быть обеспечено его выпрямление. При этом вопрос о параметрах детектора является весьма существенным. Дело в том, что при перемещении скважинного прибора с зондом на измерительных электродах последнего будет происходить изменение амплитуды полезного сигнала с частотой

$$f = 1/T = v/(2 \cdot 3600 \cdot h),$$

где f и T — соответственно частота и период изменения амплитуды полезного сигнала, v — скорость перемещения зонда по стволу скважины (в м/ч) и h — минимальная мощность пластов (в м), которую желательно зафиксировать на диаграмме. При $v = 3000$ м/ч и $h = 0,5 \div 1$ м основная составляющая измеряемого напряжения будет иметь частоту $f = 0,8 \div 1,6$ Гц.

В связи с тем, что частота полезного сигнала весьма близка к несущей (20 Гц), параметры детектора должны быть подобраны таким образом, чтобы он эффективно подавлял последнюю при коэффициенте передачи в полосе пропускания, равном или близком к единице. При этом линейное выпрямление должно быть обеспечено во всем динамическом диапазоне измерительного канала.

§ 2. ОПИСАНИЕ АППАРАТУРЫ

В соответствии с требованиями, изложенными в предыдущем параграфе, была создана аппаратура ПЭБЗ-КГУ-1, блок-схема которой приведена на рис. 51, одновременно поясняющем принцип работы всей установки для измерений в скважинах четырехэлектродными градиент-зондами большого размера.

Структура и принцип работы. Весь измерительный комплекс состоит из скважинного прибора с зондом и поверхностной панели, соединяющихся между собой трехжильным бронированным кабелем.

От стабилизатора тока, входящего в состав универсального блока питания УИП-К станции АКС, постоянный ток 0,4 А поступает в поверхностную панель на блок защиты, предназначенный для ограничения напряжения питания скважинного прибора на уровне 380 В, а затем по броне и одной из жил кабеля подается в скважинный прибор на блок питания. Последний представляет собой мощный преобразователь, который трансформирует поступивший в него постоянный ток в необходимое число гальванически не связанных ни между собой, ни с жилами кабеля напряжений нужных величин, использующихся для питания узлов скважинного прибора.

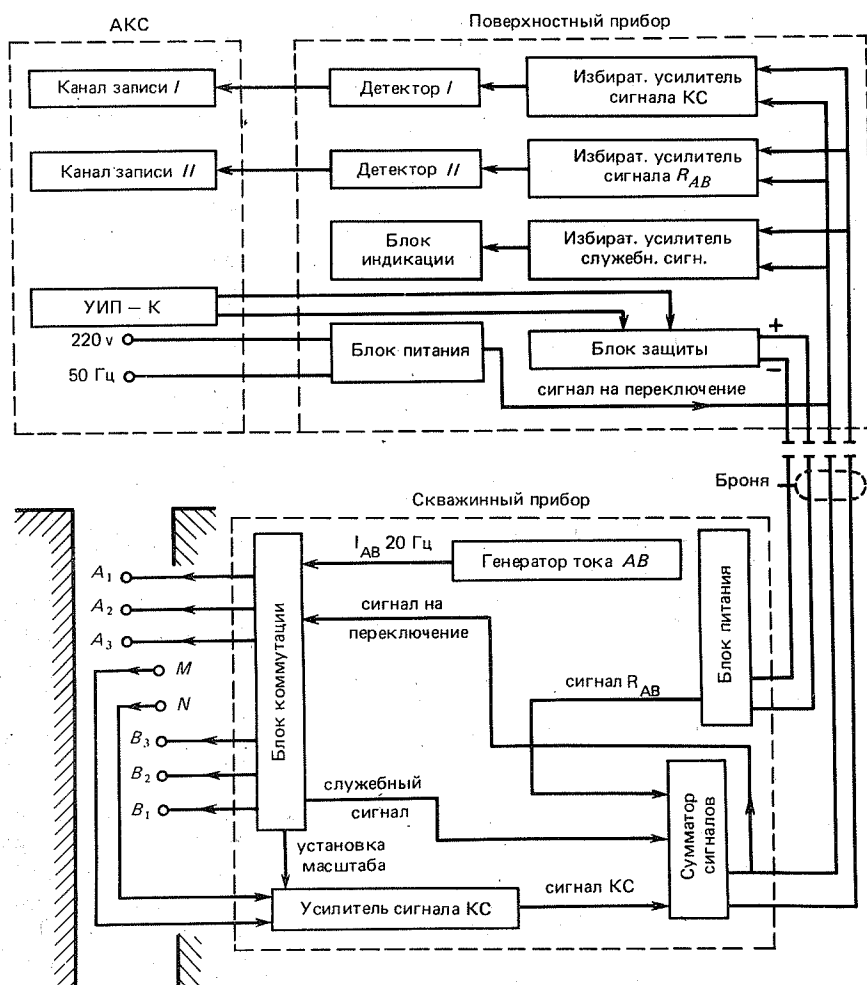


Рис. 51. Блок-схема аппаратуры ПЭБЗ-КТУ-1

Генератор тока АВ формирует переменный ток с сигналом прямоугольной формы 0,5 А частотой 20 Гц, которым с помощью электродов А и В в окружающей скважинный прибор среде возбуждается переменное электрическое поле.

Блок коммутации по команде, подаваемой с поверхностной панели, подключает к выходу генератора тока АВ одну из пар токовых электродов, одновременно устанавливая соответствующий коэффициент усиления усилителя сигнала КС и частоту служебного сигнала, информирующего оператора о включенном режиме работы. Командой

на переключение служит наличие в информационных жилах кабеля постоянного тока около 3 мА, поступающего из блока питания поверхностной панели.

Всего с помощью блока коммутации может быть установлено четыре разных режима работы скважинного прибора. В первых трех осуществляется регистрация кривых КС разными по размеру зондами, а четвертый предназначен для калибровки измерительного канала. Изменение режимов работы может производиться автоматически, когда через интервал времени 4 с последовательно по замкнутому циклу включается каждая из позиций, и вручную по команде оператора.

В режиме „калибровка” вход усилителя сигнала КС отключается от измерительных электродов MN и на него из блока коммутации подаются стабильные по амплитуде прямоугольные импульсы той же частоты, что и в линии AB . Кроме того, в этом же режиме работы к выходу генератора тока AB вместо токовых электродов подключается резистор сопротивлением 10 Ом. Соответствующий этому сопротивлению сигнал, формирующийся в блоке питания скважинного прибора, служит для калибровки тракта измерения R_{AB} , которое может осуществляться во всех остальных режимах работы скважинного прибора одновременно с регистрацией ρ_K .

Возникающая на измерительных электродах MN разность потенциалов частотой 20 Гц, несущая информацию об удельном сопротивлении пород, проходит через усилитель сигнала КС и с помощью активных фильтров высоких и низких частот, обеспечивающих срез амплитудно-частотной характеристики соответственно на 15 и 24 Гц, фильтруется от низкочастотных помех, создаваемых полем ПС, а также высокочастотных составляющих, обусловленных промышленными токами. Коэффициенты передачи усилителя в разных режимах работы соотносятся между собой как коэффициенты соответствующих зондов.

С выхода усилителя сигнал КС поступает в сумматор. Одновременно из блока коммутации на него подается служебный сигнал, информирующий о режиме работы скважинного прибора, а из блока питания скважинного прибора – сигнал R_{AB} , показывающий величину сопротивления между электродами AB . С выхода сумматора все три сигнала по информационным жилам кабеля передаются в поверхностную панель на гнезда „сигнал” (рис. 52), с которых, в свою очередь, они поступают на избирательные усилители поверхностного прибора.

Избирательный усилитель КС служит для выделения из сигнала, поступающего из скважинного прибора, составляющей, несущей информацию о сопротивлении пород, которая передается по кабелю на частоте 20 Гц способом амплитудной модуляции. Подавление боковых частот осуществляется шестью включенными друг за другом активными фильтрами верхних и нижних частот, обеспечивающими срез

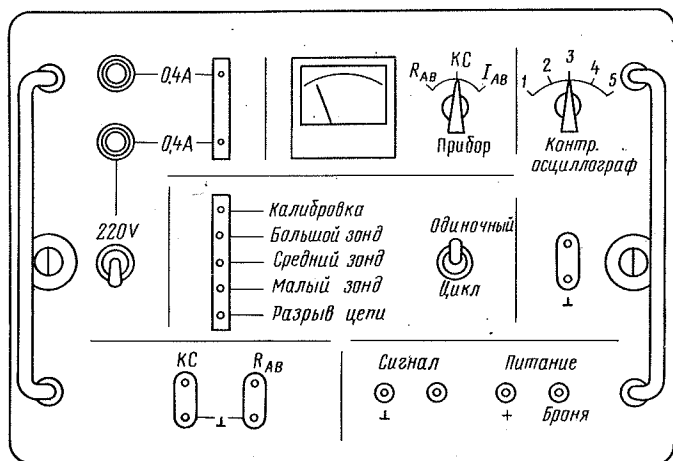


Рис. 52. Лицевая панель поверхностного блока аппаратуры ПЭБЗ-КГУ-1

амплитудно-частотной характеристики соответственно на 15 и 24 Гц.

Линейное детектирование переменного напряжения частотой 20 Гц в пределах от $5 \cdot 10^{-3}$ до 10 В осуществляется прецизионным амплитудным детектором I , с выхода которого выпрямленное напряжение через сглаживающий фильтр поступает на гнезда „КС” поверхностной панели (см. рис. 52), к которым подключается измерительный канал I станции АКС.

Усилитель сигнала R_{AB} аналогичен усилителю сигнала КС. Выход его через детектор и сглаживающий фильтр выведен на гнезда „ R_{AB} ” поверхностной панели, с которых постоянное напряжение снимается на измерительный канал II станции АКС. Предусмотрено также визуальное наблюдение за изменением сигнала КС и R_{AB} с помощью стрелочного прибора.

Избирательный усилитель служебного сигнала предназначен для выделения последнего из суммы сигналов, поступающих в поверхностную панель по информационным жилам кабеля. Выделение служебного сигнала осуществляется четырьмя включенными друг за другом активными фильтрами верхних и нижних частот, обеспечивающими срез амплитудно-частотной характеристики соответственно на 0,4 и 1 кГц.

В блоке индикации усиленный служебный сигнал подвергается обработке с помощью частотного детектора и логической схемы, управляющей световыми индикаторами, расположенными на лицевой панели (см. рис. 52) и информирующими оператора о включенном режиме работы скважинного прибора.

Блок питания служит для преобразования переменного тока

напряжением 220 В частотой 50 Гц в выпрямленные стабилизированные напряжения, необходимые для питания электронных схем поверхностной панели, а также формирует сигнал на переключение режимов работы скважинного прибора. Контроль за наличием в панели переменного тока частотой 50 Гц осуществляется с помощью светодиода зеленого цвета.

Конструкция. Поверхностная панель выполнена в виде сменного блока к аппаратурному стенду лаборатории АКС. На лицевую панель ее (см. рис. 52) выведены следующие органы управления и индикации:

тумблер „220 В”, включающий сеть 220 В и цепь стабилизатора тока УИП-К;

предохранитель „0,4 А” сети 220 В;

световой индикатор „0,4 А” наличия напряжения 220 В, загорающийся при включении тумблера „220 В”;

предохранитель „0,4 А” цепи стабилизатора тока УИП-К;

световой индикатор „0,4 А” наличия тока от стабилизатора тока УИП-К, загорающийся при включении тумблера „220 В”;

световые индикаторы „Калибровка”, „Большой зонд”, „Средний зонд”, „Малый зонд”, загорающиеся при поступлении со скважинного прибора соответствующего служебного сигнала;

световой индикатор „Разрыв цепи”, загорающийся при наличии разрыва в цепи электродов АВ или в цепи питания скважинного прибора;

тумблер „Одиночный – Цикл”, служащий для подачи в скважинный прибор команды на переключение режимов работы;

стрелочный миллиамперметр и переключатель „Прибор”, служащие для визуального контроля силы тока в цепи АВ, либо величины КС, либо величины R_{AB} ;

переключатель и гнезда „Контр. осциллограф”, служащие для подключения электронного осциллографа к некоторым точкам электрической схемы поверхностной панели;

гнезда „КС” и „ R_{AB} ”, служащие для подключения измерительных каналов станции АКС;

гнезда „Сигнал” и „Питание”, служащие для подключения скважинного прибора.

Питание на поверхностную панель от станции АКС подается с помощью стандартного разъема на шасси панели, которая, как и обратная сторона лицевой панели, служит местом расположения монтажных плат и других элементов электронной схемы.

Скважинный прибор с зондом (рис. 53) конструктивно состоит из цилиндрического герметичного охранный кожуха и двух кос (верхней и нижней), на которых установлены три пары токовых электродов A_1B_1 , A_2B_2 , A_3B_3 и пара измерительных электродов MN. Электронные

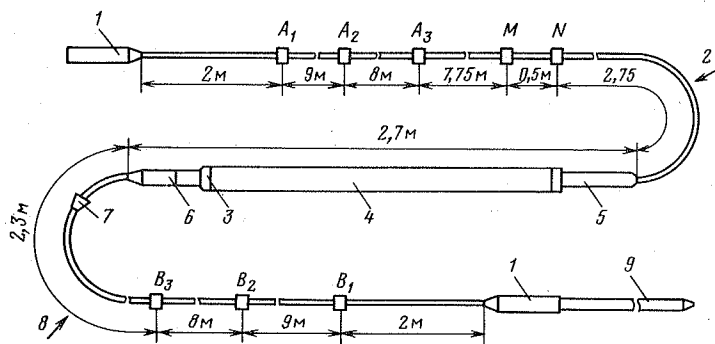


Рис. 53. Схема конструкции скважинного прибора аппаратуры ПЭБЗ-КГУ-1 с зондом:

1 — полумуфта ПМ-60; 2 — верхняя коса; 3 — мост ДРСТ; 4 — кожух; 5 — мост ИК-БК; 6 — кабельный наконечник НК-60; 7 — утолщение для фиксации косы на столе ротора; 8 — нижняя коса; 9 — груз

узлы скважинного прибора смонтированы на отдельных платах, установленных на специальном шасси, жестко соединенном с мостом от скважинного прибора аппаратуры ДРСТ, имеющим окончание под стандартный кабельный наконечник НК-60. Шасси вставляется в охранный кожух, представляющий собой стальную трубу длиной 1,7 м с внешним диаметром 90 мм, толщиной стенок 10 мм, и закрепляется в нем с помощью накидной гайки моста.

Верхняя коса — это отрезок трехжильного кабеля типа КТШ-4 или КТО-4 длиной 30 м с прикрепленными к нему с помощью изоляционной ленты накладными проводами. Для механического и электрического соединения верхней косы с кабелем используется стандартная полумуфта типа ПМ-60, а со скважинным прибором — мост типа ИК-БКМ-01-000-000. Накладные провода служат для электрического соединения корпуса полумуфты и расположенных на верхней косе токовых электродов A_1 , A_2 , A_3 и приемных электродов MN с контактами разъема моста ИК-БКМ и далее с электрической схемой скважинного прибора.

Нижняя коса представляет собой отрезок кабеля типа КТШ-2 или КТО-2 длиной 22 м с установленными на нем токовыми электродами B_1 , B_2 , B_3 . Для механического соединения нижней косы с грузом служит полумуфта ПМ-60, а с мостом ДРСТ — кабельный наконечник НК-60, что позволяет отсоединять косу от скважинного прибора без разгерметизации последнего, что важно при транспортировке прибора и выполнении спуско-подъемных операций.

Герметизация внутренней полости охранный кожуха осуществляется с помощью резиновых уплотнительных колец, имеющих на пробках мостов и полумуфт.

Технические характеристики. Аппаратура для электрометрии большими зондами (ПЭБЗ-КГУ-1) позволяет за один спуск исследовать разрез скважин со скоростью порядка 2000 м/ч поочередно тремя четырехэлектродными зондами и имеет четыре режима работы: „калибровка“; „большой зонд“ (А25М0,5N25В; К = 7849,2 м); „средний зонд“ (А16М0,5N16В; К = 3214,6 м); „малый зонд“ (А8М0,5N8В; К = 803 м).

Основные технические характеристики приведены ниже.

Диапазон измерения кажущегося сопротивления, Ом·м	0,5–1000
Нелинейность амплитудной характеристики измерительного тракта КС, включая фоторегистратор станции, во всем динамическом диапазоне и во всех режимах работы, %	≤ 3
Полоса пропускания измерительного тракта КС на уровне 3 дБ во всех режимах работы, Гц	15–24
Подавление гармонического сигнала частотой 5 Гц и ниже в измерительном тракте КС, дБ	≥ 80
Входное сопротивление скважинного усилителя сигнала КС во всех режимах работ, кОм	≥ 150
Частота переменного тока с сигналом прямоугольной формы в цепи электродов АВ во всех режимах работы, Гц	20
Ток в цепи АВ во всех режимах работы, А	0,5
Диапазон изменения сопротивления в цепи АВ, в пределах которого ток изменяется не более чем на 3 %, Ом	0–300
Элементная база электронной схемы скважинного прибора и поверхностной панели	Транзисторы и микросхемы
Диапазон температур, °С:	
поверхностной панели	+ 10 – + 30
скважинного прибора	0 – + 80
Внешнее давление для скважинного прибора, МПа	≤ 60
Масса поверхностной панели, кг	≤ 5
Масса скважинного прибора с верхней „косой“, кг	≤ 80
Масса нижней „косы“, кг	≤ 30

Величина калибровочного сигнала соответствует кажущемуся сопротивлению 15 Ом·м.

Электропитание аппаратуры осуществляется от универсального источника питания УИП-К станции АКС напряжением 220 В, частотой 50 Гц и стабилизированным постоянным током 0,4 А напряжением до 400 В.

§ 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ АППАРАТУРЫ

Испытания аппаратуры ПЭБЗ-КГУ-1 в скважинах проводились с целью определения ее эксплуатационных характеристик в производственных условиях:

максимальной величины сопротивления между токовыми электродами R_{AB} , определяющей стабильность тока в питающей цепи;

величины сигнала КС в обсадной колонне, показывающей уровень помех в тракте измерения и определяющей нижний предел измерения кажущегося сопротивления;

воспроизводимости измерений, показывающей стабильность работы одного и того же комплекса аппаратуры;

сходимости измерений, определяющей идентичность показаний разных комплектов аппаратуры, что, в свою очередь, зависит от методики и тщательности их эталонирования.

Результаты испытаний показали, что аппаратура ПЭБЗ-КГУ-1 работает стабильно и надежно, а ее метрологические характеристики соответствуют требованиям решаемых геологических задач. В частности, многократные измерения R_{AB} в скважинах с различными геолого-техническими условиями показали, что сопротивление питающей цепи между электродами АВ не превышает 245 Ом, что полностью совпадает с расчетными данными.

Величина ρ_k в обсадной колонне измерялась при расположении скважинного прибора с зондами в колонне ниже уровня промывочной жидкости и для разных комплектов аппаратуры составила $0,4 \pm \pm 0,1$ Ом·м.

Воспроизводимость измерения проверялась путем сравнения основной записи кривой КС с контрольной (через интервал 1 ч). Пример такого сравнения по материалам исследования скв. 6933 Ново-Елховской площади ТАССР показан на рис. 54. Как следует из этого рисунка, расхождения кривых крайне незначительны, что свидетельствует о высокой стабильности работы аппаратуры. При этом отметим, что заметного проникновения напряжения $\Delta U_{ПСМН}$ в тракт измерения КС при скорости регистрации до 3 км/ч не наблюдается. Аналогичные результаты были получены и для других комплектов аппаратуры ПЭБЗ-КГУ-1.

Проверка аппаратуры на сходимость измерений производилась путем сравнения кривых КС, записанных в одном и том же интервале скважины разными комплектами аппаратуры. Пример такого сравнения по скв. 2092 Березовской площади ТАССР приведен на рис. 55. Обе кривые повторяют друг друга, в то же время показания одного прибора в пластах высокого сопротивления примерно на 13 % ниже показаний другого. Систематическое занижение показаний одного из приборов при полном подобии конфигурации кривых свидетельствует о том, что расхождение определяется либо различной величиной коэффициента усиления усилительного тракта, либо неодинаковым током в цепи электродов АВ. И то и другое легко устраняется путем тщательного подбора номиналов элементов электронной схемы и ее регулировкой.

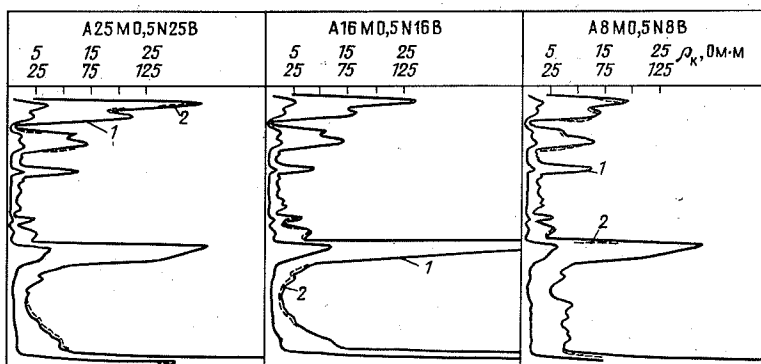


Рис. 54. Воспроизводимость измерений аппаратурой ПЭБЗ-КГУ-1.
Кривые записи: 1 – основной, 2 – контрольной

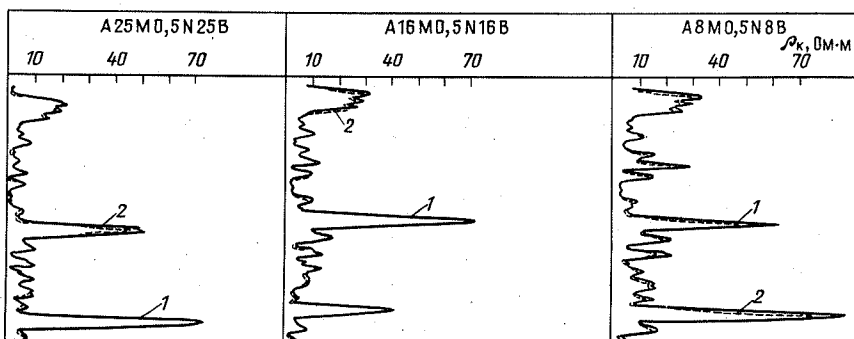


Рис. 55. Сходимость измерений аппаратурой ПЭБЗ-КГУ-1, проведенных разными комплектами (кривые 1 и 2)

Таким образом, испытания аппаратуры в глубоких скважинах дали положительный результат по ее эксплуатации в производственных условиях при исследовании скважин четырехэлектродными градиент-зондами большого размера.

§ 4. ВОЗМОЖНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ НЕСКОЛЬКИХ КРИВЫХ КС РАЗНЫМИ ПО РАЗМЕРУ ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНЫМИ ГРАДИЕНТ-ЗОНДАМИ

Аппаратура ПЭБЗ-КГУ-1 позволяет за один спуск скважинного прибора поочередно производить измерения тремя четырехэлектродными градиент-зондами разного размера. В то же время современные тенденции развития промыслово-геофизической аппаратуры заключаются в создании комплексных скважинных приборов, способных

одновременно регистрировать несколько параметров одного или разных методов исследования. В связи с этим рассмотрим возможности одновременной регистрации нескольких кривых КС разными по размеру четырехэлектродными градиент-зондами.

Из теории методов кажущегося сопротивления известно, что смена назначений парных электродов зондовой установки не влияет на величину регистрируемых ρ_k . Тем не менее на выборе назначений парных электродов, т.е. структуры зонда, следует остановиться особо, поскольку этим во многом определяется функциональная схема скважинного прибора, а также его характеристики.

В современной промышленно-геофизической аппаратуре, предназначенной для исследования разреза скважин методами КС, исследуемое электрическое поле в породах возбуждается либо непрерывно, т.е. в течение всего времени исследования, либо периодически, т.е. импульсами, состоящими из одного или нескольких периодов тока, питающего электроды АВ. В выпускаемой серийно как одно-, так и многоканальной аппаратуре используется первый способ возбуждения поля. В новых же разработках предпочтение отдается второму способу. Последнее вызвано стремлением создать по возможности простые многоканальные скважинные приборы, способные за один рейс регистрировать несколько различных параметров, в том числе и таких, которые не совместимы друг с другом по времени.

Учитывая то, что окружающий скважину проводник имеет сложную физическую природу и в нем могут иметь место различные явления, вызываемые внешним электрическим полем (поляризация, переходные процессы и т.п.), а также то, что теория методов КС разработана в основном для стационарных процессов, непрерывное возбуждение электрического поля в породах представляется более обоснованным и целесообразным. Поэтому при разработке аппаратуры для исследования разрезов скважин несколькими зондовыми установками следует выбирать такой их тип, который позволил бы возбуждать электрическое поле в породах непрерывно.

Исследовать разрез скважин несколькими четырехэлектродными градиент-зондами большого размера, непрерывно возбуждая электрическое поле в породах только одним постоянно работающим генератором тока, позволяют зондовые установки типа M_iABN_i , у которых питающими являются два сближенных электрода АВ, а измерительными — пары удаленных электродов M_iN_i , причем последних может быть любое число. Согласно принципу взаимности эти зонды по величине регистрируемых КС полностью эквивалентны зондам типа A_iMNB_i , использованным в аппаратуре ПЭБЗ-КГУ-1. Вместе с тем возможность практического применения зондов этого типа оставалась неясной в связи с опасением о возможности большого уровня помех на разнесенных на большое расстояние друг от друга измерительных электродах.

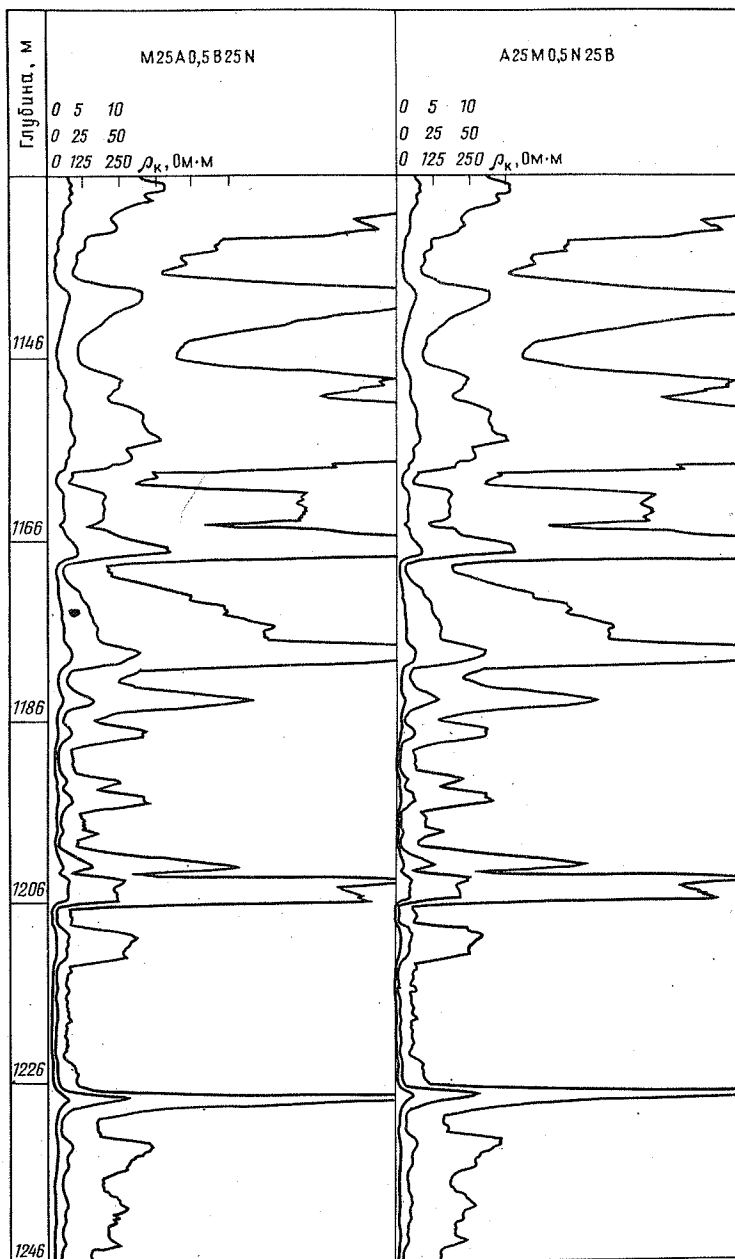


Рис. 56. Фрагменты диаграмм КС, записанных зондами типов AMNB и MABN

Для выяснения этого вопроса аппаратурой ПЭБЗ-КГУ-1, снабженной дополнительным блоком, были проведены измерения в скважинах зондами А25М0,5N25В и М25А0,5В25N. Фрагмент зарегистрированных ими диаграмм КС приведен на рис. 56. Кривые $\rho_{\text{к}}$, записанные зондами обоих типов как в пластах высокого, так и низкого сопротивления, полностью идентичны. Это свидетельствует о том, что уровень наводок у зондов типа МАВN не выше, чем у зондов АМNВ и, следовательно, с точки зрения влияния помех, условия измерения ими полностью тождественны.

Достоинством зондов типа МАВN, помимо возможности одновременного измерения разностей потенциалов на нескольких парах приемных электродов, является также значительно меньшее по сравнению с зондами типа АМNВ сопротивление между питающими электродами АВ (R_{AB}). Действительно, оно складывается из контактного сопротивления заземления, которое при используемых в практике электротметрии электродах не может быть больше сопротивления столба промывочной жидкости, заполняющей ствол скважины, и заключенного между питающими электродами АВ, определяемого по формуле

$$R_c = \rho_c \cdot 4 l_{AB} / (\pi d_c^2),$$

где R_c — сопротивление столба промывочной жидкости, заполняющей ствол скважины, и заключенного между электродами АВ; ρ_c — удельное сопротивление промывочной жидкости; l_{AB} — расстояние между электродами АВ; d_c — диаметр скважины. Так, при $d_c = 0,2$ м и $\rho_c = 2$ Ом·м сопротивление R_c для зонда типа АМNВ с $l_{AB} = 50$ м составит примерно 3000 Ом, а у эквивалентного ему зонда типа МАВN с $l_{AB} = 0,5$ м — только 30 Ом. С учетом контактного сопротивления, равного примерно 24 Ом (см. § 1 гл. VI), у зондов типа МАВN полное сопротивление равно 54 Ом, что примерно в 5 раз меньше, чем у зонда типа АМNВ. Последнее обстоятельство позволяет увеличить ток в цепи электродов АВ до нескольких ампер, что для градиент-зондов большого размера, коэффициент которых достигает 7800 м, а разности потенциалов на приемных электродах падают до первых десятков микровольт, весьма желательно.

Таким образом, в аппаратуре, предназначенной для одновременного исследования разреза скважин несколькими градиент-зондами большого размера, наиболее целесообразно использовать зондовые установки типа МАВN, позволяющие возбуждать электрическое поле в породах непрерывно одним генератором тока, увеличить ток в цепи электродов АВ до нескольких ампер и регистрировать КС любым числом пар измерительных электродов.

С целью форсирования внедрения в производство метода исследе-

дования скважин четырехэлектродными градиент-зондами большого размера с одновременной регистрацией нескольких кривых КС аппаратное обеспечение его имеет смысл ориентировать на использование уже освоенных промышленностью измерительных комплексов. Это позволит в более короткие сроки опробовать метод в различных регионах страны и, опираясь на силы опытно-методических партий промыслово-геофизических организаций, быстро внедрить его в производство.

Анализ технических параметров и схемных решений выпускаемой серийно и готовящейся к выпуску техники, предназначенной для исследования буровых скважин, показал, что наиболее подходящими для указанной цели являются комплексный скважинный прибор электрометрии Э1 и обслуживающие его блоки управления Б2 и частотной демодуляции Б1. Эта аппаратура имеет: три измерительных канала, которые дают возможность регистрировать три диаграммы КС одновременно; широкий диапазон рабочих температур, что позволяет использовать ее практически во всех нефтегазоносных районах страны; достаточно высокие метрологические характеристики и перспективу широкого использования в ближайшие годы. При этом не исключена возможность сохранения универсальности серийной аппаратуры и ее параметров (кроме скважинного прибора) при работе в составе других (стандартных) измерительных комплексов.

Глава VII

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНЫМИ ГРАДИЕНТ-ЗОНДАМИ БОЛЬШОГО РАЗМЕРА

§ 1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОЛЛЕКТОРОВ КАРБОНАТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ТАТАРИИ

В разрезе палеозоя Татарии выделяется ряд пластов-коллекторов, приуроченных к стратиграфическим подразделениям девона и карбона. Локальные коллекторы в толщах девона приурочены к доманиковому, мендымскому, верхнефранским и фаменским отложениям. Среди карбонатных коллекторов развиты регионально прослеживающиеся в каменноугольных отложениях Урало-Поволжья верхнетурнейские, серпуховско-башкирско-московские коллекторы, а также развитые в отдельных районах Татарии алексинские, малевско-упинские и завожские пласты.

Доманиковский горизонт включает от одного до трех пластов-коллекторов. Нефте вмещающими породами являются плотные известняки и доломиты с редкими маломощными прослоями мергелей.

Известняки микро- и тонкозернистой структуры и слабо выраженной слоистой текстуры. Доломиты слабо известковистые, тонко- и мелкозернистые с беспорядочной или слабо микрослоистой текстурой. В известняках и доломитах наблюдаются редкие межзерновые тонкие и мелкие (0,08–0,2 мм) лапчатой формы поры. Отдельными прослойками и участками породы мелкокавернозны. Отмечается трещиноватость пород. Трещины вертикальные, слабо наклонные, иногда горизонтальные, в основном закрытые.

По данным лабораторных определений пористость матрицы карбонатных пород изменяется от 1 до 3 %, в единичных образцах – до 10,3 %, поровая проницаемость от 0,15 до 18,6 фм^2 и более; пласты-коллекторы доманиковского горизонта относятся к низкоемким и низкопроницаемым порово-каверново-трещинным коллекторам.

В *мендымском горизонте* выделяют до трех пластов-коллекторов. Нефте вмещающие породы представлены пачкой переслаивающихся битуминозных глинистых известняков, мергелей и отчасти доломитов.

Известняки микро- и тонкозернистые, мелко- и среднезернистые, органогенно-обломочные и обломочные. Доломиты имеют массивную текстуру и средне- и мелкозернистую структуру.

Все известняки и доломиты плотные. Межзерновые поры и поры выщелачивания приурочены в основном к перекристаллизованным участкам. Иногда наблюдаются каверны выщелачивания, имеющие размеры от 1 до 20 мм. Поры и каверны полностью или частично выполнены кристаллически-зернистым кальцитом, доломитом или черным битумом. Общим для пород горизонта является трещиноватость. Наиболее трещиноваты мергели и доломиты. Ширина трещин от 0,02 до 2–3 мм. Подавляющее большинство наблюдаемых трещин выполнено кальцитом и пиритом, глинисто-органическим веществом и метаморфизованным битумом.

Открытая пористость пород изменяется в пределах 0,6–1 %, в единичных образцах – 5–10 %; проницаемость исследованных образцов имеет нулевое значение.

Породы-коллекторы мендымского горизонта отнесены к порово-каверново-трещинному и порово-стилолитово-трещинному типам.

В составе *верхнефранского подъяруса* выделяется один пласт-коллектор. Среди преобладающей массы микро- и тонкозернистых глинистых известняков встречаются отдельные прослои более чистых перекристаллизованных, кавернозных известняков с неравномерно зернистой структурой. Известняки глинистые и постепенно переходят в мергели. Доломиты, встречающиеся в виде маломощных прослоев, в разной степени известковистые, сильно глинистые. Породы плотные,

слабопористые. Отдельные разности известняков и доломитов слабо кавернозны. Во всех литологических разностях пород наблюдается трещиноватость.

По лабораторным определениям открытая пористость в известняках составляет 0,1–7,5, в доломитах 0,65–4,1, в мергелях 0,4–9,8 %. Проницаемость в большинстве образцов имеет нулевые значения, в отдельных образцах достигает сотых долей квадратных фемтометров.

Карбонатные породы верхнефранского подъяруса отнесены к каверново-трещинному и порово-трещинному типам коллекторов.

Фаменский ярус в нижней части представлен органогенными известняками, а в верхней – однородной толщей преимущественно хемогенных известняков и доломитов с линзами гипса и ангидрита.

В нижнефаменских образованиях выделяют два пласта-коллектора, в верхнефаменских – три. Нефте вмещающими породами являются микрозернистые известняки и известковистые доломиты. Известняки и доломиты плотные, крепкие, неравномерно глинистые, прослоями до перехода в мергели.

Емкостное пространство в микрозернистых известняках состоит из межзерновых пустот; средняя пористость образцов порядка 1 %. В органогенно-обломочных известняках поровое пространство образовано межформенными порами и пустотами выщелачивания; средняя пористость пород составляет 2–5 %. Развита трещиноватость пород.

Наличие каверн, пор выщелачивания и межгранулярных пор в плотной матрице, а также трещин дало основание отнести породы-коллекторы фаменского яруса к порово-каверново-трещинному и каверново-порово-трещинному типам. Местами карбонатные отложения фаменского яруса закарстованы, что приводит к поглощениям промывочной жидкости в процессе бурения.

В *турнейском ярусе* по керну и промыслово-геофизическим материалам выделено пять пористо-проницаемых пачек. Между ними есть пачки уплотненных, но трещиноватых пород с низкой поровой емкостью и проницаемостью. Мощность уплотненных пачек незначительна и они могут служить породами-проводниками, что нередко влечет за собой формирование в турнейском ярусе залежей нефти массивного типа.

Нефте вмещающие породы *заволжского горизонта* сложены известняками органогенно-детритовыми, реже органогенными, слабо гранулированными, прослоями перекристаллизованными, доломитизированными, часто трещиноватыми. Структура порового пространства известняков меняется от тонкой межзерновой до крупной межформенной. Наблюдаются большие колебания значений пористости и проницаемости. Так, в матрице каверново-трещинных известняков пористость изменяется от 1 до 8,5 %, в поровых – от 8 до 16 %. Проницаемость колеблется от нуля до сотен квадратных фемтометров.

Породы-коллекторы тонко переслаиваются с известняками уплотненными и плотными с пониженными и плохими коллекторскими свойствами. Тип коллекторов смешанный, поровый, в верхней части горизонта часто трещинно-порово-каверновый.

Малеовско-упинские отложения включают пласт-коллектор, представленный известняками органогенной и органогенно-обломочной структуры. Известняки сильно гранулированы, „гравийно-песчаного” облика, иногда трещиноватые, плитчатой текстуры. Значения пористости 10–19 %, в отдельных случаях до 27 %. Преобладает пористость 13–15 %. На основании этого пласт-коллектор отнесен к типу поровых, классу высоко- и среднеемких.

Черепетский горизонт содержит пласт-коллектор, сложенный известняками органогенно-детритовыми, реже зернистыми, прослоями слабо доломитистыми, обычно слабо гранулированными, с макро- и микротрещинами. Характерно развитие тонкой межзерновой структуры порового пространства и микрослоистой текстуры. Пористость по ядерным данным – 8–11 %. Прослой известняков органогенно-обломочной структуры – высокопористые. Проницаемость низкая, часто нулевая. Тип коллектора в основном трещинно-поровый, класс низко- и среднеемких.

Кизеловский горизонт включает пласт-коллектор, представляющий систему пористо-проницаемых прослоев, чередующихся с уплотненными. В разрезах сводовых и присводовых скважин коллектор представлен известняками органогенно-детритовыми, зернистыми и органогенно-обломочными, участками окремнелыми, в разной степени гранулированными. Характерно развитие сгустково-комковатой текстуры и межформенной структуры порового пространства. Тип коллектора поровый.

При размыве кровли турнейского яруса в разрезах с сокращенной мощностью кизеловского горизонта в известняках пласта-коллектора отмечено снижение пористости матрицы породы, а также наличие редких, но крупных вторичных пор-каверн. Тип коллектора переходит в смешанный трещинно-каверново-поровый.

При поровом типе коллектора пористость достигает 13–15 % и более, что позволило оценить его как средне- и высокеемкий. В матрице смешанного типа коллекторов пористость снижается до 8–10 %.

В *карбонатных породах визейского яруса* выделено четыре пласта-коллектора. Промышленная нефтеносность установлена в нижнем, относящемся к алексинскому горизонту.

Пласт представлен известняками и доломитами микрозернистыми, трещиноватыми, кавернозными, неравномерно нефтенасыщенными. Известняки интенсивно гранулированные, перекристаллизованные, сульфатизированные, трещиноватые. Кроме трещин в известняках

довольно часто встречаются небольшие (0,52–0,63 мм) каверны. Доломиты плотные, имеют мелкозернистую структуру и беспорядочную текстуру. В доломитах развито большое количество тонких межзерновых, иногда сообщающихся между собой пор. Открытая пористость пород 1,6–15,8 %. Тип коллектора, условно, трещинно-поровый, класс низко- и среднеемких.

В *серпуховском ярусе* пласт-коллектор выделяется в его верхней части. Распространен он спорадически. Нефтеемещающими являются известняки, в разной степени доломитистые, вторично кальцитизированные, с глинистыми промазками по трещинам и стилолитам.

Установлено два типа коллектора: смешанный (трещинно-каверново-поровый) и, реже, поровый. Для первого характерна очень плотная матрица с тонкой межзерновой структурой порового пространства и низкие значения пористости по керну. Поровый тип коллектора установлен в известняках органогенно-обломочных и псевдооолитовых с межформенной структурой порового пространства. Класс коллектора меняется от низко- и средне- до высокоемкого.

Среди пород-коллекторов *башкирского яруса* выделяются две разновидности: известняки органогенно-обломочные, органогенно-детритовые, в разной степени гранулированные, переходящие в псевдооолитовые, в матрице пористые и проницаемые; известняки интенсивно перекристаллизованные, с трещинами и стилолитами, выполненными глинистым веществом, с редкими крупными порами выщелачивания. Переход одной разновидности в другую часто очень резкий. Общим для них является однотипность структуры и развитие четкой микрокомковатой текстуры. Различие заключается в количестве и характере распределения цементной массы. В известняках первой разновидности цемент присутствует в виде корочки, что обуславливает межформенную структуру порового пространства с хорошей сообщаемостью пор просветленностью от 0,7 до 1,2 мм. Известняки близки к гранулярному типу коллектора, имеют среднюю и высокую пористость и проницаемость.

Известняки второй разновидности характеризуются развитием вторичного кальцитово-доломитового цемента базального типа. Структура порового пространства тонкая межзерновая, просветленность в пределах 0,01 мм. Наличие макропор и трещин, а также осложненные условия проходки с частыми уходами циркуляции промывочной жидкости и провалами инструмента явились основанием для отнесения этих известняков к типу трещинно-каверново-поровых коллекторов средней и высокой емкости, хорошей проницаемости.

Преобладающий тип залежей нефти в башкирском ярусе – массивный.

В отложениях *верейского горизонта* выделяется от 4 до 6 пластов.

По структуре среди карбонатных пород-коллекторов выделяются

следующие разновидности: известняки органогенные, органогенно-обломочные, органогенно-детритовые, реже зернистые разности и метасоматические породы (доломитовые известняки и доломиты) и породы, переходные между известняками и алевролитами. Наибольшим распространением пользуются известняки первых двух разностей. Основную породообразующую роль в них играют форменные элементы, составляя 70–80 % массы породы. Такие породы при небольшом количестве цемента содержат большое число крупных (до 0,4–0,8 мм) открытых, хорошо сообщающихся между собой пор, т.е. обладают типичной межформенной структурой порового пространства и имеют высокие коллекторские свойства. Пористость в таких случаях достигает максимальных значений 17–20 %, а проницаемость – 100 фм^2 . Это послужило основанием для отнесения их к типу поровых. Класс коллекторов меняется от низкоемких до средне- и высокоемких.

Преобладающий тип залежей нефти в верейском горизонте – пластовый сводовый.

В составе *каширского горизонта* выделяют до трех пластов-коллекторов.

Породы-коллекторы представлены известняками реликтивно-органогенной структуры, неравномерно доломитовыми, сильно выщелоченными, трещиноватыми. Форма пор овальная, круглая, сообщаемость их хорошая. Трещины беспорядочно расположенные, вертикальные, раскрытостью 0,01–0,8 мм, заполнены тонкозернистым кальцитом, часто с пленкой нефти. Тип коллекторов трещинно-поровый, класс средне- и высокоемкий.

В *подольском горизонте* выделяется до пяти пластов-коллекторов. Породы-коллекторы представлены известняками биоморфными, прослоями комковатыми, пористыми и доломитами известковистыми с ухудшенными коллекторскими свойствами вследствие загипсованности и наличия тонких прослоев и примазок глинистого материала. Поры неправильной формы соединяются друг с другом непосредственно или многочисленными микротрещинками. Тип коллекторов условно трещинно-поровый, класс средне- и высокоемкий.

В *мячковском горизонте* развит один пласт-коллектор, представленный органогенными известняками, некоторые разности которых слабо доломитизированы и сульфатизированы. Пористость колеблется от 1,5 до 12,5 %. Поры первичные и вторичные, преобладают последние. Вторичные поры соединяются между собой микротрещинками шириной 15–18 $\mu\text{м}$. Тип коллектора, ориентировочно, трещинно-поровый.

В целом структура порового пространства пород карбонатных коллекторов девона и карбона Татарии изменяется по разрезу от самой простой – поровой до самой сложной – порово-каверново-трещинной. При этом характерно преобладание сложных типов коллекто-

ров в отложениях девона. Вместе с тем отметим, что часто наряду с преимущественным развитием какого-либо одного типа порового пространства в подчиненном количестве в том же коллекторе бывают развиты и другие типы пористости, что сильно затрудняет изучение их промыслово-геофизическими методами.

§ 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА НАСЫЩЕНИЯ КОЛЛЕКТОРОВ

Одним из основных преимуществ четырехэлектродных градиент-зондов большого размера по сравнению с другими зондами электрометрии является большая глубинность исследования при высокой дифференциации разреза по вертикали и существенном снижении влияния экранирования, поэтому наибольший эффект их применение дает при изучении характера насыщения маломощных коллекторов с глубокими зонами проникновения промывочной жидкости. Однако выделять в разрезе сами пласты-коллекторы эти зонды в общем случае не могут. Поэтому интерпретация получаемых четырехэлектродными градиент-зондами материалов должна проводиться в комплексе с методами, реагирующими на изменения коллекторских свойств пород.

Применяемый в Татарии обязательный комплекс промыслово-геофизических исследований в разных по категориям скважинах и на различных интервалах разреза неодинаков. Как правило, весь ствол скважины в масштабе глубин 1:200 исследуется методами ИМ, БМ, МЗ, НГМ и ГМ. В продуктивных отложениях нижнефранского подъяруса верхнего девона, а также средне- и нижневизейского подъярусов и турнейского яруса нижнего карбона эти исследования дополняются записью кривых КС и ПС стандартным потенциал-зондом В7,5А0,75М и зондами метода БЭЗ. В ряде случаев замеры потенциал-зондом в масштабе 1:200 перекрывают верей-башкирские отложения среднего карбона. В последующем все перечисленные методы для краткости будем именовать стандартным комплексом исследований. В оценочных, а также особо интересных разведочных и эксплуатационных скважинах в ограниченном объеме применяются также ядерно-магнитный и акустический методы (ЯММ и АМ).

Бурение скважин осуществляется обычно с применением ЕВС, а при вскрытии продуктивных отложений часто используются ПАВ, что способствует образованию в коллекторах глубоких зон проникновения промывочной жидкости.

Исследование скважин промыслово-геофизическими методами проводится, как правило, в два этапа. Предварительные исследования выполняются после вскрытия верхнетурнейских образований, а окончательные – по достижении проектной отметки. Для получения качественных материалов перед проведением измерений ЕВС в интер-

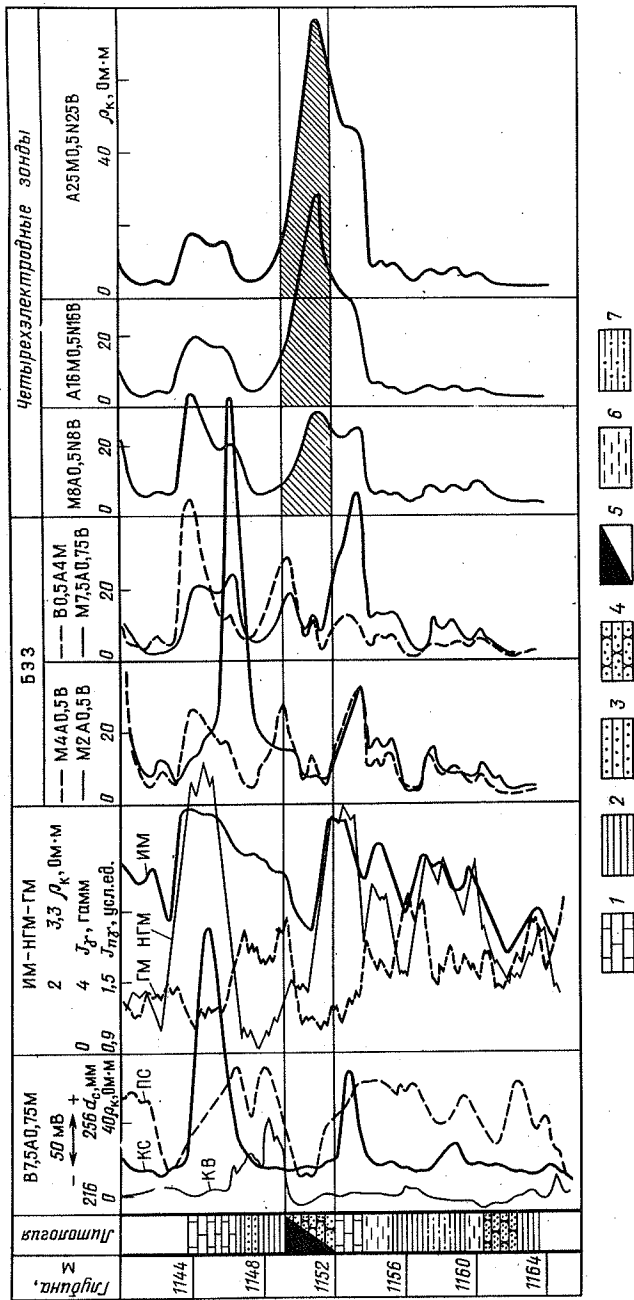


Рис. 57. Сопоставление диаграмм электро- и радиометрии по скв. 14092 Абрахмановской площади.
 1 — известняк; 2 — глина; 3 — песок; песчаники; 4 — водоносный; 5 — нефтеносный; 6 — алевролит; 7 — аргиллит

вале исследований заменяется на нормальный глинистый раствор.

Ниже приведены примеры решения с помощью четырехэлектродных градиент-зондов задачи по определению характера насыщения пластов-коллекторов. При этом для иллюстрации эффективности их применения описание кривых КС дано в сопоставлении с материалами стандартного комплекса ГИС, а там, где это было возможно, с данными, полученными при помощи сверлящего керноотборника (СКО) комплекта испытательных инструментов (КИИ) и результатами анализа керна.

На рис. 57 кривые КС четырехэлектродных градиент-зондов большого размера, зарегистрированные в скв. 14092 Абдрахмановской площади, приведены в сопоставлении с диаграммами стандартного потенциал-зонда 87,5А0,75М с кривой ПС и кавернограммой, ГМ, НГМ, БЭЗ и нормализованной по пористости кривой ИМ. Рассматриваемый интервал разреза включает тульские и бобриковские отложения.

Наибольший интерес представляет участок разреза в интервале глубин 1146,6–1153,4 м, включающий три пласта: сверху до глубины 1149,6 м он представлен глинами, затем до отметки 1151,6 м следует нефтеносный песчаник с $k_{п\text{ НГМ}} = 19\%$, с глубины 1151,6 м подстилаемый плотным карбонатным пластом („тульский известняк“). Последний на диаграммах всех методов электрометрии отмечается четким максимумом кажущихся сопротивлений.

Нефтеносный песчаник, как и расположенный выше пласт глин, стандартным потенциал-зондом отмечается кажущимся сопротивлением, равным 14 Ом·м, а на кривой ИМ – 3 Ом·м, тогда как против глинистого пласта зарегистрировано $\rho_k = 5$ Ом·м. Приведенные значения кажущихся сопротивлений против нефтеносного пласта обусловлены весьма глубоким проникновением фильтрата промывочной жидкости, образовавшим, по-видимому, сложную, так называемую окаямляющую зону проникновения.

На диаграммах градиент-зондов, входящих в комплект БЭЗ, глинистый пласт отмечается четким максимумом сопротивлений, а нефтеносный песчаник попадает в зону минимума. Такое нехарактерное поведение кривых КС свидетельствует об их сильной закрапированности, коренным образом изменившей представление об истинном распределении удельных сопротивлений в рассматриваемой части разреза.

На кривых КС четырехэлектродных градиент-зондов пласт глин характеризуется сопротивлением 5 Ом·м, а нефтеносный песчаник выделяется в виде четкого максимума с кажущимся сопротивлением до 77 Ом·м (зондом с $L = 25$ м). Подстилающий пласт известняка на фоне этого максимума характеризуется небольшим изломом кривой КС с максимальным сопротивлением до 50 Ом·м.

Таким образом, нефтенасыщенность песчаника в данном случае

удается определить лишь с помощью четырехэлектродных градиент-зондов, обладающих, с одной стороны, существенно большей, по сравнению с другими методами электрометрии, глубиной исследования, а с другой — испытывающих на себе минимальное влияние экранирования неоднородностями разреза. Установив нефтенасыщение указанного пласта песчаника, с помощью четырехэлектродных зондов была открыта новая, неизвестная ранее на данной площади нефтяная залежь в тульских отложениях, что было подтверждено бурением близрасположенных соседних скважин.

На рис. 58 представлены диаграммы электро- и радиометрии, зарегистрированные в скв. 2437 Акташской площади в интервале залегания бобриковско-турнейских отложений нижнего карбона. По кривым стандартного комплекса методов в интервале 1022–1023,6 м отчетливо выделяется пласт песчаника с $k_{\Pi} \text{ НГМ} = 20 \%$. Однако характер насыщения его по сопротивлениям, зарегистрированным потенциал-зондом, методами ИМ, БМ и БЭЗ, надежно установить не удастся.

Действительно, стандартным потенциал-зондом здесь регистрируется $\rho_k = 12 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, методом ИМ — порядка 5–6 Ом·м, методом БМ — 15 Ом·м, а на кривых КС зондов М4А0,5В и М7,5А0,75В из комплекта БЭЗ фиксируются сопротивления 5–8 Ом·м, причем на фоне вмещающих глинистых пород пласт выделяется весьма нечетко.

На кривых КС четырехэлектродных градиент-зондов рассматриваемый пласт отчетливо выделяется повышенными кажущимися сопротивлениями до 30 Ом·м (зондом с $L = 25 \text{ м}$), свидетельствующими о его нефтенасыщенности. На основании такой характеристики по четырехэлектродным градиент-зондам он был рекомендован для испытаний, в результате которых получили промышленные притоки нефти.

Тождественная с описанной ситуация была установлена в скв. 2508 Ямашинской площади, которая бурилась как нагнетательная. В результате исследований, выполненных четырехэлектродными градиент-зондами, пласт песчаников в бобриковских отложениях был испытан и дал промышленную нефть, на основании чего скважина переведена в фонд эксплуатационных.

В интервале 1026,8–1030 м скв. 2437 Акташской площади расположены нефтенасыщенные известняки турнейского возраста. Почти всеми методами стандартной электрометрии, а также четырехэлектродными градиент-зондами большого размера они характеризуются повышенными сопротивлениями. В то же время обращает на себя внимание, что зондом М7,5А0,75В из комплекта БЭЗ, имеющим практически такой же размер, что и четырехэлектродный градиент-зонд А8М0,5Н8В, указанный пласт не выделяется, что обусловлено большей заэкранированностью кривой КС трехэлектродного зонда по сравнению с четырехэлектродным.

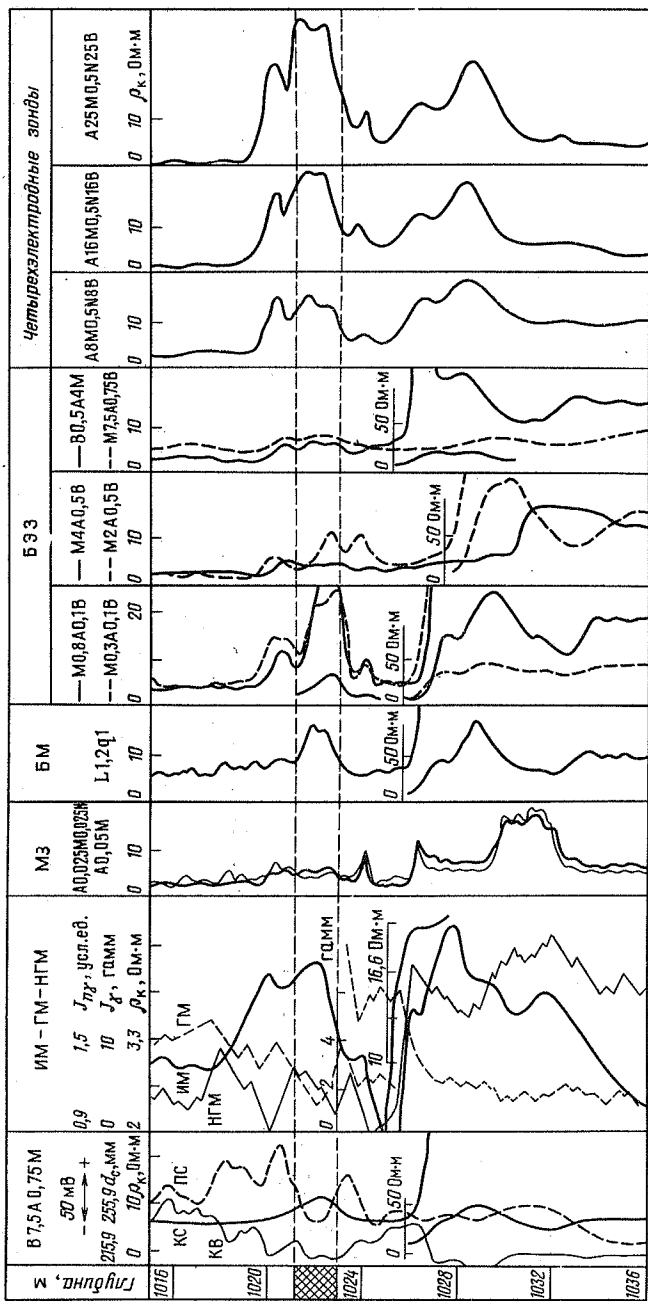


Рис. 58. Сопоставление диаграмм электро- и радиометрии по скв. 2437 Актаншской площади. Здесь и далее штриховкой выделены пластины-коллекторы

Наличие экранирования на кривых КС трехэлектродных градиент-зондов четко наблюдается на диаграмме зонда М4А0,5В из комплекта БЭЗ. Уплотненный карбонатный прослой, обычно залегающий в кровле турнейских отложений и отчетливо отмечающийся на кривых МЗ в интервале 1026,2–1026,8 м, создает экранный минимум на диаграмме зонда М4А0,5В до глубины 1030,8 м, т.е. как раз на интервале, равном размеру зонда, в результате чего вся нефтенасыщенная часть пласта попадает в зону экранного минимума и, следовательно, не может быть выделена.

Водонасыщенные известняки турнейского возраста ниже 1030 м на диаграммах четырехэлектродных зондов с L , равными 16 и 25 м, имеют кажущееся сопротивление около 5 Ом·м, что практически совпадает с их удельным сопротивлением, тогда как методы стандартной электрометрии регистрируют против них сопротивления более 10 Ом·м. Последнее объясняется наличием повышающего проникновения в водонасыщенную часть коллектора и относительно малой глубиной исследования традиционных методов электрометрии.

В скв. 16983 Альметьевской площади (рис. 59) бобриковские отложения были вскрыты на ЕВС с добавлением ПАВ. В результате интерпретации комплекса ГИС на ЭВМ по программе ГИК-2 в интервале 1120,6–1122,2 м был выделен слабонефтенасыщенный пласт алевролита с $\rho_{\Pi} = 3,2$ Ом·м. Кажущееся сопротивление его, зарегистрированное зондом В7,5А0,75М и методом БМ, составляет 7 Ом·м, а методом ИМ – 6,3 Ом·м. При этом четкость выделения рассматриваемого пласта на фоне вмещающих пород на кривых КС стандартного потенциал-зонда, метода ИМ и градиент-зондов большого размера из комплекта БЭЗ весьма слабая, а на кривых ИМ и БМ сопротивлениями до 7 Ом·м отмечается только верхняя часть пласта, тогда как нижняя характеризуется сопротивлениями порядка 2,5 Ом·м. В то же время на кривых КС четырехэлектродных градиент-зондов весь пласт выделяется очень отчетливо повышенными кажущимися сопротивлениями до 16 Ом·м (зондом с $L = 25$ м). Высокая рельефность выделения нефтенасыщенного пласта среди вмещающих пород на диаграммах четырехэлектродных градиент-зондов позволяет уточнить положение его границ, которые, в отличие от результатов интерпретации стандартного комплекса ГИС, совершенно однозначно определяются на глубинах 1121,3–1122,8 м, что полностью совпадает с интервалом глинистости на кривой ГМ.

В целом приведенное описание позволяет сделать вывод о том, что даже при вскрытии продуктивных отложений на промывочной жидкости с добавлением ПАВ, заведомо приводящим к образованию весьма глубоких зон проникновения в пласты-коллекторы, исследования четырехэлектродными градиент-зондами большого размера

позволяют надежно установить истинный характер насыщающего их флюида.

Помимо рассмотренного пласта алевролита в скв. 16983 представляет интерес карбонатный прослой мощностью 0,7 м, залегающий в интервале 1117,7–1118,4 м и отчетливо выделяющийся на диаграммах всех, за исключением потенциал-зонда, методов ГИС.

Как следует из рассмотрения рис. 59, этот прослой характеризуется повышенной плотностью по НГМ и пониженной глинистостью по ГМ. Кажущиеся сопротивления против него на диаграмме БМ составляют 6 Ом·м, на кривой КС стандартного потенциал-зонда – 4,5 Ом·м, на диаграмме ИМ – 5,4 Ом·м, а на кривых КС четырехэлектродных градиент-зондов возрастают с увеличением их размера от 16 до 25 м, достигая величины 25 Ом·м (показания зонда с $L = 25$ м). Такая характеристика позволяет предполагать, что указанный пласт является нефтенасыщенным. При этом в нем, по-видимому, образовалась кольцевая (окаймляющая) зона понижающего проникновения, расположенная на небольшом расстоянии от ствола скважины. Об этом, в частности, свидетельствует сначала спад, а затем нарастание кажущихся сопротивлений, регистрируемых методами электротометрии с последовательно увеличивающейся глубиной исследования. Следует отметить, что надежность заключения о нефтенасыщенности рассматриваемого пласта намного увеличилась бы при наличии более определенных данных об отнесении его к классу коллекторов.

На рис. 60 приведено сопоставление материалов комплекса ГИС с кривыми КС четырехэлектродных градиент-зондов и диаграммами метода АМ в интервале верейских отложений скв. 6623 Ново-Елховской площади.

В результате машинной интерпретации в рассматриваемой части разреза выделены следующие пласты (табл. 11).

Привлечение к интерпретации диаграмм КС четырехэлектродных градиент-зондов позволяет выделить и выше глубины 952,4 м два нефтенасыщенных пласта в интервалах 938,2–939,5 и 942,1–943,0 м. Первый из них, судя по диаграммам методом определения пористости, представлен сильно глинистыми, преимущественно трещиноватыми карбонатными породами с коэффициентом пористости порядка 10 %. На диаграмме зонда А25М0,5Н25В $\rho_K = 46$ Ом·м, тогда как на кривых стандартного потенциал-зонда и метода ИМ они не превышают 7 Ом·м. Последнее объясняется, по-видимому, глубоким понижающим проникновением в пласт промывочной жидкости по трещинам.

Порово-трещинный карбонатный коллектор в интервале 942,1 – 943,0 м имеет пористость несколько меньше 10 % и, судя по кривой ГМ, является менее глинистым. Кажущееся сопротивление его (по диаграмме зонда А25М0,5Н25В) достигает 29 Ом·м, что свидетельствует о нефтенасыщении. На кривой КС стандартного потенциал-зонда $\rho_K =$

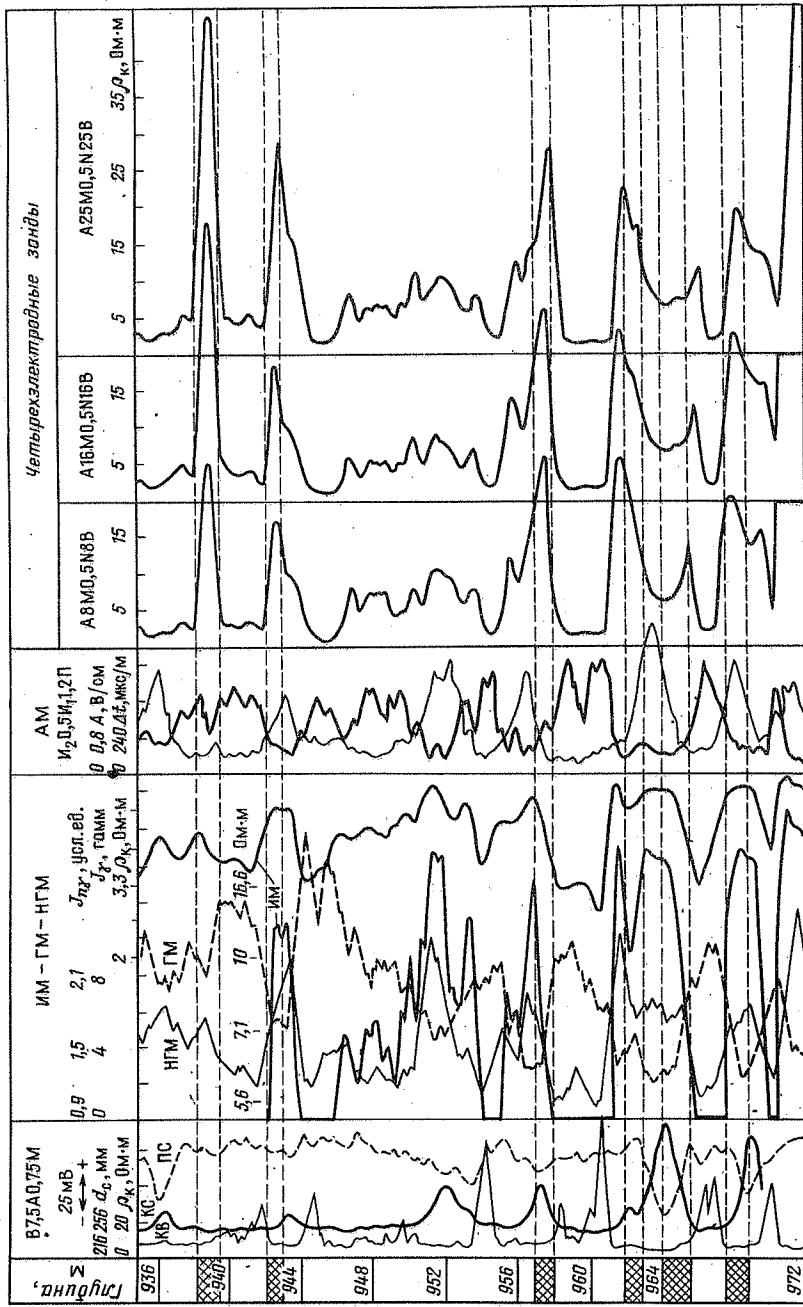


Рис. 60. Сопоставление диаграмм электро- и радиометрии по скв. 6623 Ново-Елховской площади

Таблица 11

Интервал, м	h, м	$\rho_{П}$, Ом·м	$k_{Н}$, %	$k_{П}$, %	$k_{ГП}$, %	Литология	Характер насыщения
952,4*—953,2	0,8	8,5	—	8	15,9	Карбонаты	Вода
956,0—957,6	1,6	19,5	49,5	8,9	4,7	— " —	Слабое нефтенасыщение
962,8—965,2	2,4	34,8	67,0	11,1	4,7	— " —	Нефть
968,0—969,4	1,4	46	68,3	10,3	3,3	— " —	— " —

* Выше 952,4 м заслуживающих внимания интервалов на ЭВМ не выделено.

= 8 Ом·м, а на кривой ИМ — не превышает 12 Ом·м, что так же, как и в предыдущем случае, объясняется глубоким понижающим проникновением. Характерно, что подстилающий более плотный (по НГМ и АМ) карбонатный пласт четырехэлектродными градиент-зондами отмечается меньшими (10–15 Ом·м) кажущимися сопротивлениями, чем вышележащий, тогда как на кривых зонда В7,5А0,75М и метода ИМ кажущиеся сопротивления выше (18 и 12,2 Ом·м соответственно). В совокупности все это свидетельствует о водонасыщенности рассматриваемого пласта. При этом зона проникновения в нем, по-видимому, невелика, в результате чего и малоглубинные методы электротметрии и четырехэлектродные градиент-зонды большого размера регистрируют близкие значения кажущегося сопротивления.

Что касается нефтенасыщенного пласта-коллектора, выделенного с помощью ЭВМ в интервале 956,0–957,6 м, то на самом деле его нефтенасыщенная часть отмечается на глубинах 957,0–958,8 м повышенными до 28 Ом·м кажущимися сопротивлениями на диаграммах четырехэлектродных градиент-зондов. Выше, в интервале 956,0–957,6 м залегают уплотненные (по НГМ и АМ) карбонатные породы, дающие максимум сопротивлений на диаграмме ИМ до 16,6 Ом·м, тогда как на кривых КС четырехэлектродных градиент-зондов они характеризуются сопротивлениями порядка 10 Ом·м. Нефтенасыщенная часть пласта в интервале 957,0–958,0 м на диаграмме стандартного потенциал-зонда имеет сопротивление 34 Ом·м, а на кривой метода ИМ — порядка 5–7 Ом·м. Это связано, по-видимому, с повышающим проникновением в нефтенасыщенный пласт и образованием в нем окаймляющей зоны пониженного сопротивления.

Но особенно интересен в разрезе верейских отложений пласт, выделенный с помощью ЭВМ в интервале 962,8–965,2 м и охарактери-

зованный как нефтенасыщенный. Считается, что на территории восточных районов Татарии он является наиболее продуктивным в отложениях верей, поскольку имеет значительную пористость (в данном случае 11,1 %) и характеризуется, как правило, высокими кажущимися сопротивлениями на диаграммах стандартного потенциал-зонда (67 Ом·м) и метода ИМ (до 25 Ом·м). Однако четырехэлектродные градиент-зонды большого размера существенно изменяют сложившееся представление.

В интервале 961,2–962,0 м, судя по данным НГМ, залегает уплотненный карбонатный пласт, являющийся покрывкой для нижележащего коллектора. Сопротивление его на диаграммах всех методов электрометрии повышенное. В интервале 963,0–965,6 м на диаграммах четырехэлектродных градиент-зондов отмечаются пониженные до 7–7,5 Ом·м кажущиеся сопротивления, что свидетельствует о водонасыщении залегающего здесь гранулярного карбонатного коллектора (пористость по НГМ 11,1 %). В то же время зондом В7,5А0,75М и методом ИМ здесь зарегистрированы высокие кажущиеся сопротивления, что обусловлено наличием глубокой зоны повышающего проникновения. Между этими двумя пластами в интервале 962,0–963,0 м залегает слабонефтенасыщенный, по-видимому, порово-трещинный карбонатный коллектор с кажущимися сопротивлениями на диаграммах стандартного потенциал-зонда, метода ИМ и зонда А25М0,5Н25В соответственно 17,10 и 17,5 Ом·м.

Таким образом, вопреки сложившимся представлениям рассматриваемый интервал разреза нефтенасыщен лишь частично, а ложное впечатление о нефтеносности его водонасыщенной части обусловлено глубоким повышающим проникновением. Отметим, что подобную же характеристику рассмотренный интервал разреза имеет во многих других скважинах.

Гранулярный карбонатный коллектор, выделенный с помощью ЭВМ на глубине 968,0–969,4 м, на самом деле с привлечением диаграмм четырехэлектродных градиент-зондов выделяется в интервале 967,6–968,8 м и характеризуется сопротивлениями (по диаграмме зонда А25М0,5Н25В) порядка 20 Ом·м, тогда как стандартным потенциал-зондом и методом ИМ против него регистрируются сопротивления 60 и 25 Ом·м соответственно. Такое снижение кажущихся сопротивлений с увеличением глубинности исследования свидетельствует о повышающем проникновении в нефтенасыщенный коллектор и возможном образовании окаймляющей зоны пониженного сопротивления.

Таким образом, интерпретация материалов ГИС по скв. 6623 Ново-Елховской площади с привлечением диаграмм четырехэлектродных градиент-зондов большого размера позволяет выделить пропущенные стандартным комплексом методов нефтенасыщенные пласты,

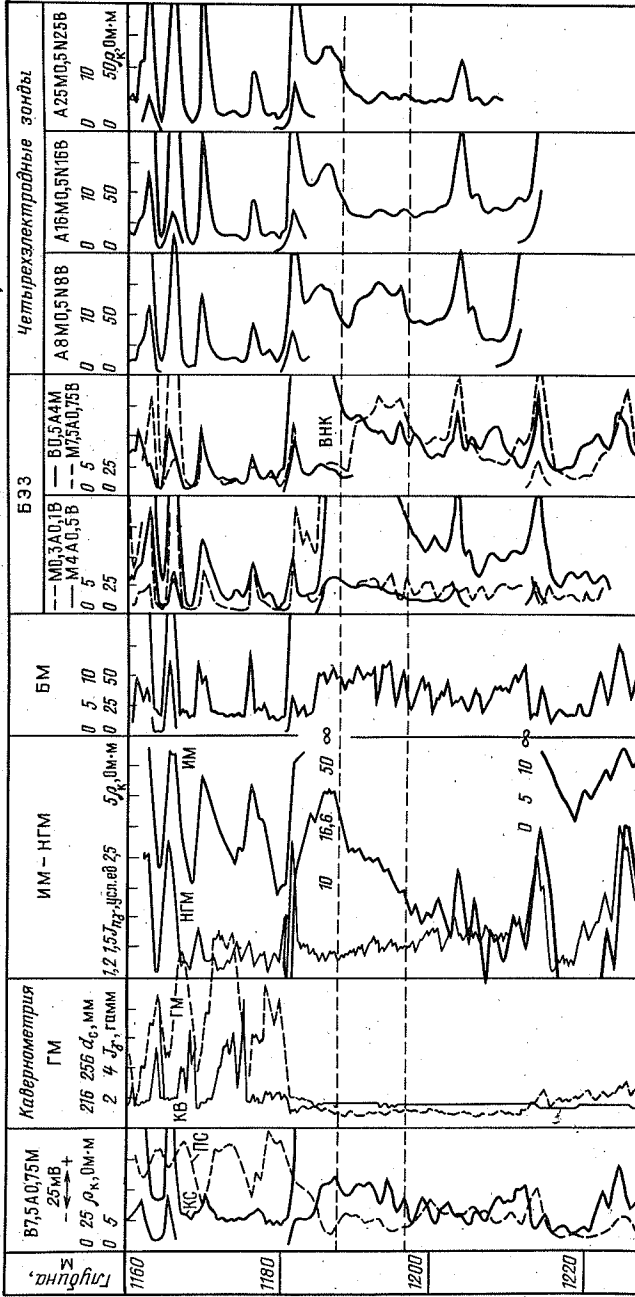


Рис. 61. Сопоставление диаграмм электро- и радиометрии по скв. 2568 Ямашинской площади

Таблица 12

Интервал, м	$H_{эф}$, м	$\rho_{П}$, Ом·м	k_H , %	$k_{П}$, %	$k_{ГП}$, %	Лито- логия	Характер насыще- ния
1182,4—1187,8	5,4	20,3	59,0	7,5	0,1	Карбо- натный уплот- ненный	Нефть
1187,8—1196,2*	8,4	9,2	47,3	7,0	0	коллек- тор	Слабо нефтя- ной
1196,2—1210,4	14,2	6—7,2	—	6—7,5	0,1—0	То же	Вода

* Водонефтяной контакт определен на глубине 1196,2 м.

исключить ложные заключения о нефтенасыщении водоносных пластов и существенно уточнить положение границ тех и других.

На рис. 61 приведен пример комплексного исследования промышленно-геофизическими методами турнейских продуктивных отложений в скв. 2568 Ямашинской площади. В скважине выполнены измерения стандартным потенциал-зондом В7,5А0,75М (КС и ПС), каверномером, зондом ИМ 4Ф0,75, методами БМ, ГМ, НГМ и четырехэлектродными градиент-зондами большого размера. Интервал исследования был вскрыт на воде, обработанной ПАВ; непосредственно перед проведением работ в скважину был закачан свежий глинистый раствор с параметрами: удельный вес — 1,3 г/см³, вязкость — 22 с, фильтрация — 7 см³/30 мин.

Материалы комплекса ГИС (без четырехэлектродных градиент-зондов) предварительно были проинтерпретированы на ЭВМ по программе ГИК-2. В результате этого карбонатные породы турнейского яруса (кровля на глубине 1181,4 м) были охарактеризованы следующим образом (табл. 12).

„Ручная” интерпретация диаграмм стандартных методов электро- и радиометрии совместно с кривыми КС четырехэлектродных градиент-зондов существенно изменяет представление о характере насыщения рассматриваемой части разреза. На глубине 1187,8 м находится ВНК, что согласуется с общепринятым положением его на данной площади. По данным четырехэлектродных зондов А16М0,5Н16В и А25М0,5Н25В в интервале 1187,8—1196,2 м $\rho_K \leq 5 \div 7$ Ом·м, что характерно для водонасыщенных карбонатных коллекторов кизеловского горизонта. Интервал 1185—1187,8 м нефтенасыщенный; параметр насыщения его P_H по данным четырехэлектродных градиент-зондов колеблется в пределах 2,4—3, что свойственно слабо-

нефтенасыщенным коллекторам. В интервале 1182,4–1185 м по материалам микрозондирования (на рис. 61 не приведены) выделяется слабопроницаемый прослой.

На диаграммах больших зондов из комплекта БЭЗ (М4А0,5В и М7,5А0,75В) кажущиеся сопротивления на интервале, равном размеру зонда, сильно занижены вследствие экранирования уплотненным пропластком, залегающим в кровельной части нефтеносного пласта (см. кривую НГМ на рис. 61), вследствие чего последний указанными зондами практически не отмечается. В отличие от этого четырехэлектродные зонды, подверженные экранированию в значительно меньшей степени, выделяют нефтенасыщенную часть пласта вполне отчетливо.

Повышенные значения кажущегося сопротивления в интервале 1187,8–1196,2 м на диаграммах ИМ, БМ, БЭЗ, а также четырехэлектродного зонда А8М0,5Н8В обусловлены глубоким повышающим проникновением промывочной жидкости, вследствие чего создается впечатление о его нефтенасыщенности.

Таким образом, понижающее экранирование на больших зондах БЭЗ, с одной стороны, и глубокое повышающее проникновение промывочной жидкости в водоносную часть коллектора, с другой, искажают правильное представление об истинном соотношении сопротивлений в рассматриваемой части разреза, что и затрудняет определение уровня ВНК стандартным комплексом методов электрометрии. В отличие от этого четырехэлектродные градиент-зонды большого размера, обладающие повышенной глубинностью исследования и в меньшей степени, чем зонды БЭЗ, подверженные влиянию экранирования, позволяют решить эту задачу совершенно однозначно, четко разделяя нефтенасыщенную и водоносную части пласта-коллектора.

Сходная с рассмотренной ситуация наблюдается в верхней части серпуховско-окских карбонатных отложений в скв. 2312 Акташской площади (рис. 62).

Судя по положительным приращениям ρ_k на кривых МЗ и сужению диаметра скважины на кавернограмме, в интервале 1002,4–1021,6 м залегаёт карбонатный пласт-коллектор, непроницаемой крышкой которого служит сильно глинистый пласт в интервале 1000–1002,4 м. В нижней части коллектор слегка заглинизирован. Пористость карбонатов невысокая, а сопротивления по ИМ – достаточно большие (свыше 100 Ом · м).

Замеры стандартным потенциал-зондом и четырехэлектродными градиент-зондами были выполнены дважды с интервалом в две недели.

На диаграммах четырехэлектродного зонда с $L = 8$ м весь интервал 1002,4–1021,6 м при первом и втором замерах отмечается повышенными кажущимися сопротивлениями до 200–250 Ом·м. В то же время на кривых КС четырехэлектродных градиент-зондов с L , равными 16 и 25 м, верхняя часть пласта до глубины 1010,4 м характеризуется

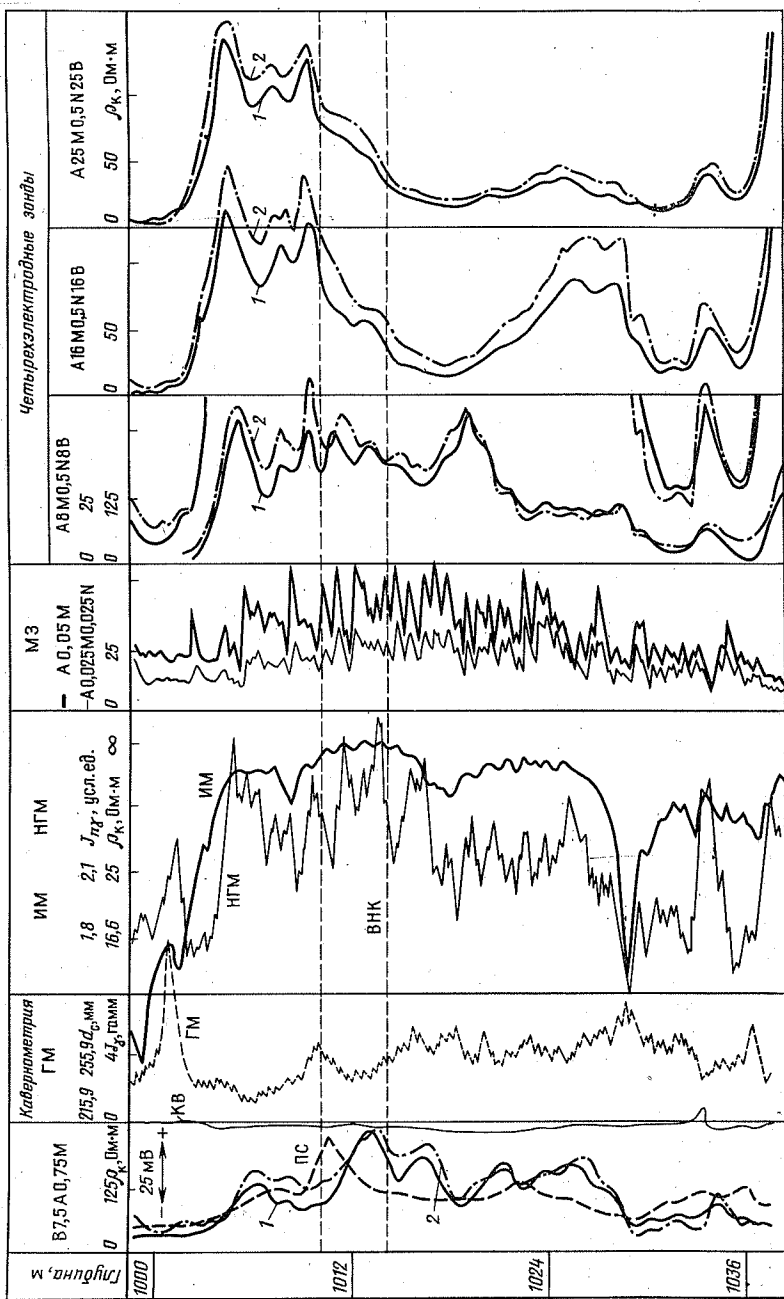


Рис. 62. Сопоставление диаграмм электро- и радиометрии по скв. 2312 Акташской площади (в интервале 1000–1036 м).
Кривые 1 и 2 для замеров первоначальных и выполненных через 15 дней соответственно

сопротивлениями порядка $125 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, тогда как нижняя (интервал 1014,4–1021,6 м) имеет ρ_k , достигающие всего $13\text{--}14 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

На основании такой характеристики можно утверждать, что верхняя часть пласта-коллектора до глубины 1010,4 м является нефтенасыщенной, а в нижней (водонасыщенной) произошло весьма глубокое повышающее проникновение промывочной жидкости, которое фиксируется повышенными сопротивлениями даже зондом с $L = 8 \text{ м}$. Методы стандартной электрометрии (зонд В7,5А0,75В и ИМ) не позволяют в данном случае расчленив нефте- и водонасыщенную части пласта-коллектора.

В интервале 1010,4–1014,4 м на кривых КС четырехэлектродных градиент-зондов с L , равными 16 и 25 м, наблюдается плавное снижение ρ_k сверху вниз, что свидетельствует, по-видимому, о наличии переходной зоны.

Так как при повторных измерениях, выполненных через две недели, зарегистрированные четырехэлектродными градиент-зондами большого размера кажущиеся сопротивления мало отличаются от первоначальных, можно утверждать, что глубокая зона проникновения сформировалась уже вскоре после вскрытия пласта и в последующем параметры ее изменялись незначительно.

Таким образом, применение четырехэлектродных градиент-зондов в данном случае позволило, благодаря их большой глубинности исследования, установить нефтенасыщение карбонатного пласта при наличии глубокого проникновения промывочной жидкости, тогда как другими методами истинный характер насыщающей пласт жидкости определить не удалось.

На рис. 63 приведено сопоставление диаграмм методов стандартной электро- и радиометрии с кривыми КС четырехэлектродных градиент-зондов, зарегистрированными в скв. 14899 Миннибаевской площади в интервале залегания основной продуктивной толщи Татарии – пашийских отложениях девона, сложенных терригенными образованиями. При рассмотрении этого рисунка прежде всего обращает на себя внимание отчетливая дифференциация разреза по сопротивлениям. Многочисленные нефтенасыщенные коллекторы чрезвычайно четко выделяются на диаграммах четырехэлектродных градиент-зондов повышенными кажущимися сопротивлениями. При этом, в отличие от методов стандартной электрометрии, конфигурация кривых проще вследствие меньшего влияния экранирования, что облегчает их чтение и обработку.

В пласте, залегающем в интервале 1677,8–1682,8 м, резким спадом ρ_k на глубине 1680,0 м уверенно отмечается ВНК. Водонасыщенный пласт-коллектор в интервале 1690,0–1693,6 м характеризуется низкими кажущимися сопротивлениями и т.д.

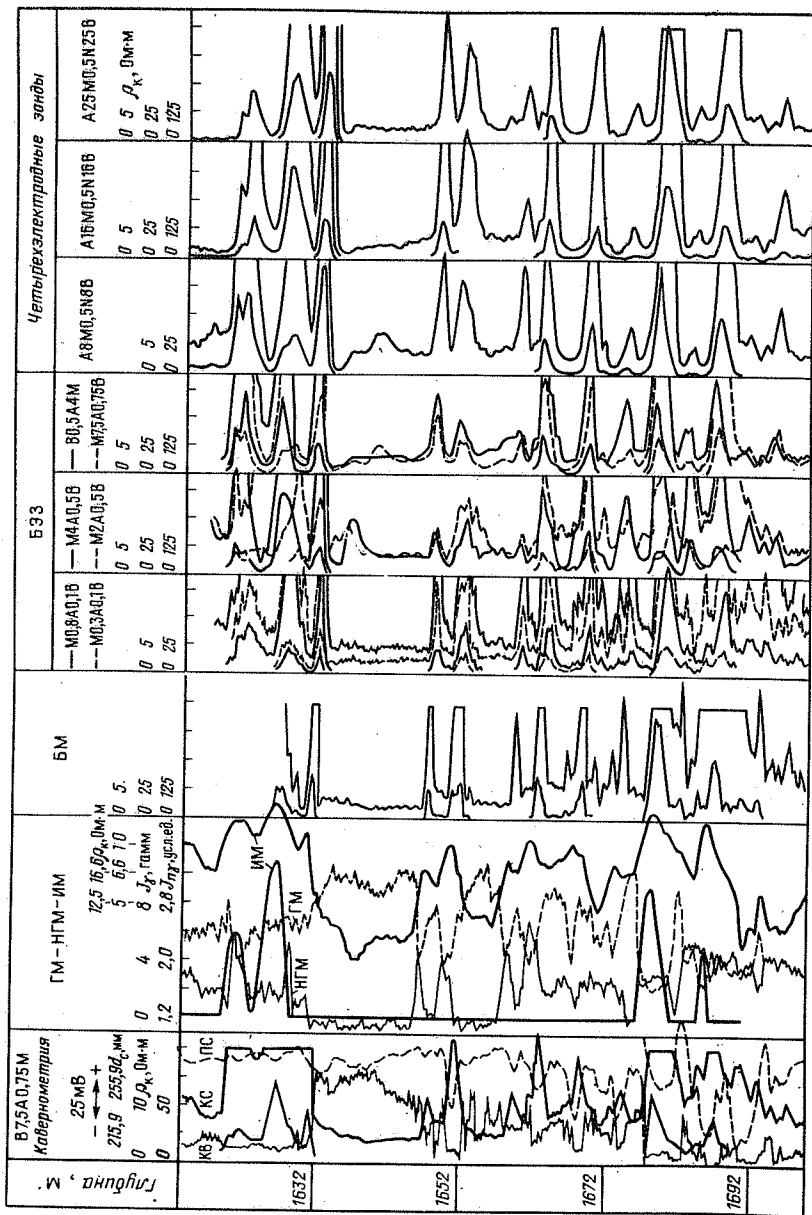


Рис. 63. Сопоставление диаграмм электро- и радиометрии по скв. 14899 Миннибаевской площади

Из приведенного сопоставления видно, что в терригенном разрезе четырехэлектродные градиент-зонды дают результаты ничуть не худшие, чем в карбонатном.

Весьма полезно использование четырехэлектродных градиент-зондов большого размера на поздней стадии эксплуатации нефтяных месторождений, когда в результате падения пластового давления в коллекторах образуются глубокие зоны проникновения, затрудняющие определение типа насыщающего их флюида существующими промыслово-геофизическими методами. Иллюстрацией этого может служить сопоставление диаграмм электро- и радиометрии в интервале девонских продуктивных отложений скв. 14086 Абдрахмановской площади, измерения в которой были выполнены 31.01.81 г. (рис. 64).

Согласно результатам интерпретации стандартного комплекса ГИС в интервалах 1643,2–1644,4 и 1652,8–1653,6 м здесь выделены слабопроницаемые нефтенасыщенные алевролиты, что вполне совпадает с характеристикой их на диаграммах КС четырехэлектродных градиент-зондов, в указанных интервалах отмечаются несколько повышенные (до 15–17 и 8,5 Ом · м соответственно) сопротивления.

Но особый интерес в рассматриваемом интервале разреза представляет пласт песчаника, залегающий на глубинах 1656,0–1658,4 м. На кривой КС стандартного потенциал-зонда он характеризуется повышенными кажущимися сопротивлениями величиной до 15 Ом · м, на диаграмме метода ИМ верхняя часть его имеет сопротивление до 11,5 Ом · м, а нижняя – порядка 7 Ом · м, на кривой БМ – соответственно 22 и 15 Ом · м, а на диаграммах БЭЗ кажущиеся сопротивления уменьшаются с увеличением размера зонда. На основании этого по стандартному комплексу методов ГИС пласт был охарактеризован как песчаник с неясным характером насыщения.

На диаграммах КС четырехэлектродных градиент-зондов указанный пласт отмечается низкими $\rho_{\kappa} = 2 \div 3$ Ом · м, что однозначно свидетельствует о его явной водонасыщенности.

Такое заключение полностью совпадает с данными опробователя пластов на кабеле (ОПК), согласно которым из верхней части пласта был получен фильтрат с удельным сопротивлением 0,87 Ом · м, а также с результатами анализа карты разработки, в соответствии с которой рассматриваемый пласт в данной скважине обводнен с 1979 г. Повышенные сопротивления против него на диаграммах стандартных методов электрометрии объясняются глубокой зоной повышающего проникновения, возникшей в обводненном коллекторе в результате падения первоначального пластового давления с 15,7 до 13,7 МПа.

Приведенный пример наглядно иллюстрирует целесообразность использования четырехэлектродных градиент-зондов большого размера для исследования продуктивных отложений на поздней стадии их разработки.

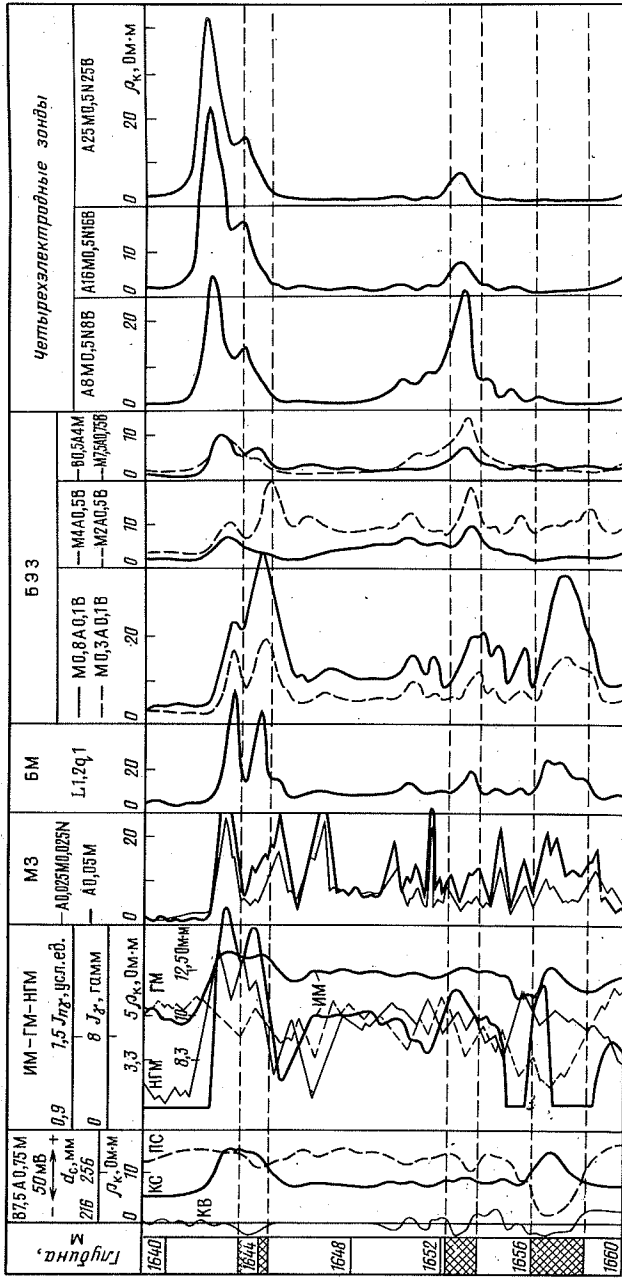


Рис. 64. Сопоставление диаграмм электро- и радиометрии по скв. 14086 Абдрахмановской площади

Как было показано ранее, кажущиеся сопротивления, регистрируемые четырехэлектродными градиент-зондами большого размера в пластах ограниченной мощности, по сравнению с другими методами электрометрии более тесно связаны с истинными удельными сопротивлениями. Для подтверждения этого на фактическом материале в скв. 2312 Акташской площади в интервале разреза, представленном чередованием маломощных пластов известняков и доломитов, с интервалом в две недели были выполнены повторные измерения кажущегося сопротивления зондом В7,5А0,75М, методом БМ с четырехэлектродными градиент-зондами. Методом ИМ замер был сделан только во второй раз, а метод БЭЗ в рассматриваемой части разреза не проводился. Сопротивление промывочной жидкости в первом случае составляло 1,4, а во втором — 1,7 Ом · м. Результаты измерений части исследованного интервала разреза представлены на рис. 65, на котором диаграммы первого и повторного замеров с целью его разгрузки приведены только для четырехэлектродных зондов и метода БМ, а для всех остальных методов изображены кривые, полученные лишь при повторном замере.

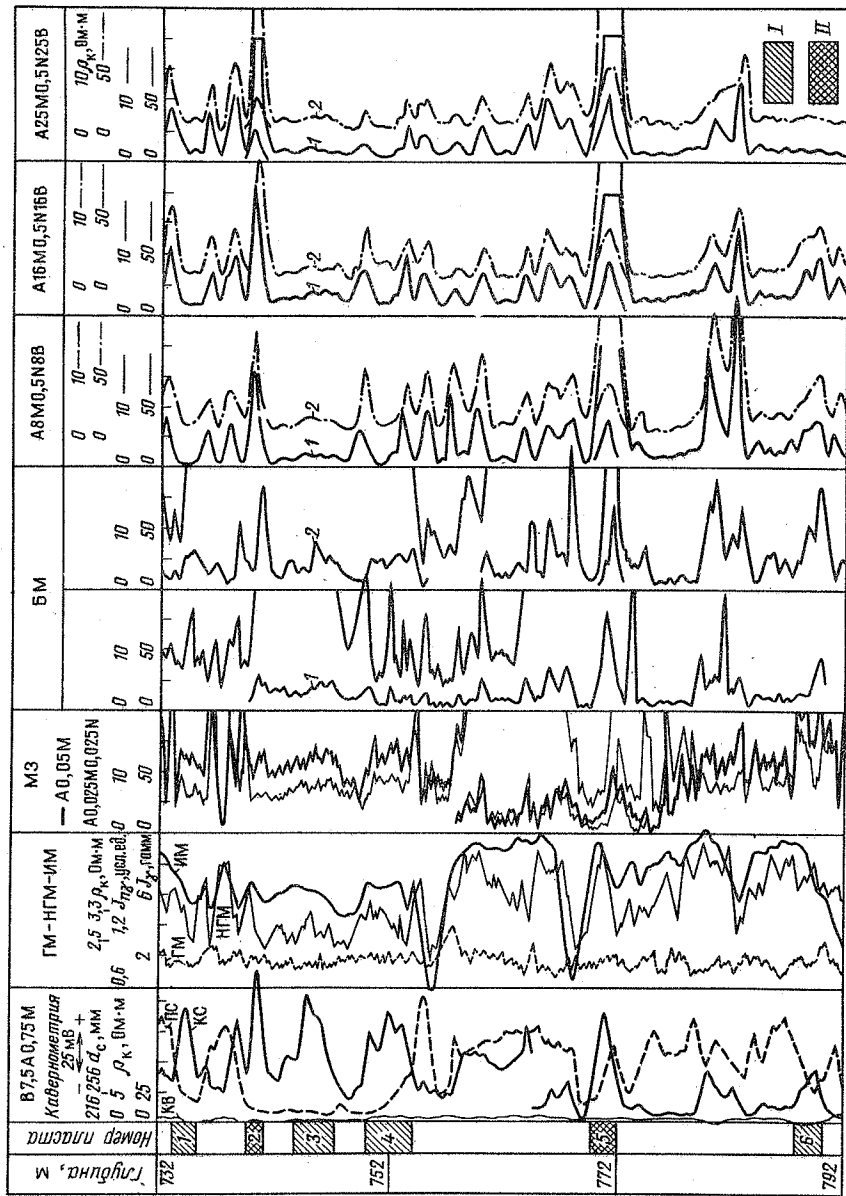
При анализе диаграмм электрометрии (см. рис. 65) обращает на себя внимание значительное сходство кривых КС стандартного потенциал-зонда, бокового метода и четырехэлектродных градиент-зондов на участках разреза, характеризующихся, как правило, положительными аномалиями на кривой ПС и повышенными показаниями на кривой НГМ. Это свидетельствует о том, что в непроницаемых или плохо проницаемых пластах все указанные методы качественно дают практически одинаковые результаты.

Совсем иная картина наблюдается в интервалах залегания пластов-коллекторов. Здесь часто повышенным кажущимся сопротивлениям на кривых потенциал-зонда и БМ соответствуют низкие сопротивления на диаграммах четырехэлектродных градиент-зондов большого размера, что объясняется водонасыщенностью коллекторов и наличием в них глубоких зон повышающего проникновения.

Обращает на себя внимание также тот факт, что степень дифференциации кривых КС четырехэлектродных градиент-зондов значительно выше, чем у кривых стандартного потенциал-зонда и, тем более, ИМ, и почти совпадает с дифференциацией кривых БМ, позволяя надежно выделять в разрезе пласты повышенного сопротивления мощностью от 0,5 м и выше.

Рассмотрим более подробно характер изменения кажущегося сопротивления, регистрируемого разными методами электрометрии при первом и втором замерах, против некоторых пластов исследованного интервала. С этой целью в табл. 13 приведены значения ρ_k (в числителе — первый замер, в знаменателе — второй), считанные с диаграмм разных зондов против ряда пластов, коэффициент пористости по

Рис. 65. Составление диаграмм электро- и радиометри по скв. 2312 Актаншской площади (в интервале 732—792 м).
 Коллекторы-известняки: I — водоносный, II — нефтеносный;
 кривые I и 2 для замеров первоначальных и выполненных через 15 дней соответственно



НГМ ($k_{\text{пНГМ}}$), а также вычисленные значения удельного сопротивления водонасыщенных пластов $\rho_{\text{п}}$ и промытой зоны $\rho_{\text{пп}}$ в предположении, что удельное сопротивление пластовой воды $\rho_{\text{в}}$ равно $0,05 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а удельное сопротивление промывочной жидкости $\rho_{\text{с}} = 1,4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Подсчет $\rho_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{пп}}$ производился по известной зависимости

$$\rho_{\text{п}} = \rho_{\text{пп}} / \rho_{\text{фл}} = 1 / k_{\text{п}}^2,$$

где $\rho_{\text{фл}}$ — удельное сопротивление флюида, насыщающего пласт.

Хотя указанная зависимость справедлива лишь для гранулярных коллекторов, с большой долей вероятности можно считать, что вычисленные с ее помощью сопротивления по порядку величины могут характеризовать и удельные сопротивления водонасыщенных карбонатных пластов, особенно при сравнительно высоких коэффициентах пористости.

Водоносные карбонатные коллекторы в интервалах 733,2–735,2; 743,6–747,2; 750–754; 787,6–790; 823,2–827,2; 859,6–861,6 и 865,6–869 м (соответственно пласты 1, 3, 4, 6, 9, 10, 11 в табл. 13) на кривых КС стандартного потенциал-зонда характеризуются повышенными кажущимися сопротивлениями от 15 до $87,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. При этом второй замер, как правило, выше первого. Это объясняется тем, что второй замер был сделан спустя две недели после первого, причем проходка скважины между замерами продолжалась, вследствие чего радиус зоны повышающего проникновения к моменту второго замера стал больше. Иногда кажущиеся сопротивления при первом и втором замерах совпадают (пласт 3 в табл. 13). Это связано, по-видимому, с тем, что уже при вскрытии данного пласта образовалась глубокая зона проникновения, что изменение ее радиуса в период между замерами не повлияло на величину кажущегося сопротивления, регистрируемого потенциал-зондом во второй раз. Этот факт позволяет сделать вывод о том, что временные замеры одним зондом электрометрии не всегда позволяют выделять в разрезе пласты-коллекторы с глубокими зонами проникновения. Для большей надежности выделения коллекторов в подобных случаях целесообразно использовать, как минимум, два разноглубинных зонда.

Кажущиеся сопротивления на кривых КС бокового метода характеризуются теми же закономерностями, что и на кривых КС стандартного потенциал-зонда, с одним отличием: разница в показаниях первого и второго замеров обычно больше, чем у потенциал-зонда. Это вполне согласуется с большим влиянием на показания метода БМ повышающего проникновения.

Методом ИМ все водоносные коллекторы отмечаются пониженными сопротивлениями. Однако величина их во всех случаях выше удельного сопротивления, вычисленного с помощью выражения (83). Объясняется это тем, что хотя глубинность исследования метода ИМ

160 Таблица 13

Номер пласта	Интервал, м	h, м	k _{гп} , % (по НГМ)	Вычисленные ρ _к (в Ом·м), считанные с диаграмм зонда						Характеристика пласта		
				ρ _{гп} Ом·м	ρ _{шп} Ом·м	В7,5А0,75М	БМ	ИМ	L = 8 м		L = 16 м	L = 25 м
1	733,2-735,2	2	13	2,9	82,8	15	7,5	-	0,5	2	1,25	Водонос- ный извест- няк
						18,5	52,5	3,5	1,5	2	1,5	
2	739,6-741,0	1,4	12,5	3,2	89,6	21	30	-	16	21	25,5	Нефтенос- ный извест- няк
						24,5	85	6,1	17	21	25,5	
3	743,6-747,2	3,6	17,5	1,6	45,7	21	22,5	-	2	3,5	2	Водонос- ный извест- няк
						21	30	5,8	3	3	2,5	
4	750,0-754,0	4	18	1,5	43,2	15	10	-	1	2,2	0,9	Водонос- ный извест- няк
						17	30	4,6	1,5	1,7	0,5	
5	770,0-772,0	2	7	10,2	285	47	80	-	40	44	55	Нефтенос- ный извест- няк
						87,5	350	15,2	42	45	53	
6	787,6-790,0	2,4	9	6,2	172,8	20	41	-	7,5	9	2,5	Водонос- ный извест- няк
						43	85	14,5	10,5	9,5	2	
7	798,8-800,0	1,2	14,5	2,4	66,6	18	30	-	20	16,5	17	Нефтенос- ный извест- няк
						28	72,5	6,8	20	16	16	

8	811,2-813,2	2	9,5	5,5	155	$\frac{41}{77}$	$\frac{70}{237}$	$\frac{-}{26}$	$\frac{37,5}{41}$	$\frac{32}{32,5}$	$\frac{48,5}{50}$	Нефтенос- ный извест- няк
9	823,2-827,2	4	17	1,7	48,4	$\frac{32}{33}$	$\frac{37,5}{50}$	$\frac{-}{18,5}$	$\frac{7}{10,5}$	$\frac{7,5}{8}$	$\frac{3,5}{3,6}$	Водонос- ный извест- няк
10	859,6-861,6	2	21	1,13	31,7	$\frac{18,5}{14}$	$\frac{27}{50}$	$\frac{-}{4,4}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{4}{3,2}$	$\frac{2}{2}$	То же
11	865,6-869,0	3,4	11	4,13	115,7	$\frac{27}{23}$	$\frac{27,5}{35}$	$\frac{-}{11}$	$\frac{2}{1,5}$	$\frac{3,5}{2}$	$\frac{2,2}{1,5}$	»

больше глубинности метода БМ и зонда Б7,5А0,75М особенно при повышающем проникновении, и им при измерениях уже частично захватывается неизменная часть водоносного пласта-коллектора, ее (глубинности) оказывается все же недостаточно для определения сопротивления пласта за зоной глубокого проникновения.

При анализе кажущихся сопротивлений, зарегистрированных в водонасыщенных пластах четырехэлектродными градиент-зондами большого размера в первый и второй раз, обращает на себя внимание тот факт, что с увеличением размера зонда разница между ними уменьшается и для самого большого зонда во всех случаях практически исчезает. Очень наглядно это можно проследить, например, в интервале 823,2–827,2 м (пласт 9 в табл. 13). Зондом с $L = 8$ м здесь при первом замере зарегистрировано $\rho_k = 7$ Ом · м, а при втором – 10,5 Ом · м. Расхождение свидетельствует о том, что изменение диаметра зоны проникновения на показаниях этого зонда еще сказывается. Зондом с $L = 16$ м в первом случае зарегистрировано $\rho_k = 7,5$ Ом · м, а во втором – 8 Ом · м. Наконец, зондом с $L = 25$ м в обоих случаях регистрируются почти одинаковые сопротивления (3,5 и 3,6 Ом · м). Практическое совпадение первого и второго замеров сопротивления зондами с L , равными 16 и 25 м, свидетельствует об отсутствии влияния на их показания изменений диаметра зоны проникновения. Снижение ρ_k от малого ($L = 8$ м) к большому ($L = 25$ м) зонду обусловлено тем, что с увеличением размера зонда и соответственно глубинности исследования влияние зоны проникновения уменьшается, вследствие чего показания самого большого зонда существенно ближе к вычисленному $\rho_{\Pi} = 1,7$ Ом · м.

Характерно, что по порядку величины кажущиеся сопротивления, регистрируемые наибольшим по размеру четырехэлектродным градиент-зондом против водонасыщенных карбонатных коллекторов, во всех случаях более близки к вычисленным удельным сопротивлениям водоносных пластов, чем кажущиеся сопротивления, фиксируемые другими методами электрометрии. Некоторое расхождение численных значений ρ_k и ρ_{Π} может быть связано с тем, что для вычисления удельного сопротивления использовалась формула (83), не совсем точно устанавливающая функциональную зависимость $P_{\Pi} = f(k_{\Pi})$ для карбонатных коллекторов.

В некоторых интервалах скважины показания всех трех четырехэлектродных градиент-зондов близки между собой (пласты 1, 3, 4, 10, 11 в табл. 13). Это является показателем того, что зона проникновения здесь относительно невелика и вследствие этого не оказывает существенного влияния на измерения.

В интервалах 739,6–741; 770–772; 798,8–800 и 811,2–813,2 м залегают нефтенасыщенные карбонатные коллекторы. Они характеризуются повышенными, по сравнению с вычисленными по формуле (83), сопро-

тивлениями на диаграммах всех без исключения методов электрометрии. При этом величина кажущихся сопротивлений, регистрируемых методом ИМ, ниже, чем у методов электрометрии с меньшей и большей, чем у ИМ, глубиной исследования. Объясняется это наличием окаймляющей зоны проникновения, имеющей низкое сопротивление, в результате чего метод ИМ, обладающий промежуточной глубиной исследования между зондом В7,5А0,75М и методом БМ, с одной стороны, и четырехэлектродными градиент-зондами, с другой, испытывает сильное влияние этой зоны. В водонасыщенных пластах, где окаймляющая зона с пониженными сопротивлениями отсутствует, наблюдается (при повышающем проникновении) постепенное уменьшение кажущегося сопротивления с увеличением глубины исследования методов электрометрии, что отражает собой постепенное снижение влияния зоны проникновения. Поэтому в данном случае заключение о нефтенасыщении пластов дано именно на основании наличия окаймляющей зоны проникновения.

Окаймляющая зона проникновения в нефтенасыщенных коллекторах образуется достаточно часто, особенно при их пониженной пористости. Поэтому ее наличие может служить одним из основных признаков, позволяющих установить нефтенасыщение уплотненных пород при отсутствии достаточных оснований для отнесения их к классу коллекторов. Однако если измерения в скважинах ограничить методами электрометрии с малой и средней глубиной исследования, то при наличии окаймляющей зоны проникновения это может привести к ложному заключению о водонасыщении нефтеносных пластов. Следовательно, для надежного выявления таких случаев необходимо использование трех зондов разной глубины: малой, средней и большой. Например, применять зонд В7,5А0,75М или БМ, метод ИМ и четырехэлектродные градиент-зонды большого размера.

При анализе табл. 13 обращает на себя внимание тот факт, что в нефтеносных пластах кажущееся сопротивление при втором замере малоглубинными методами электрометрии зачастую бывает выше, чем у четырехэлектродного зонда с $L = 25$ м. Это вполне согласуется с имеющимися в литературе данными о том, что возрастание КС при временных замерах наблюдается не только в водоносных, но и в нефтеносных пластах.

Кажущиеся сопротивления, зарегистрированные боковым методом при повторном замере против нефтеносных и водоносных пластов, по порядку величины в большинстве случаев тяготеют к вычисленным удельным сопротивлениям промытой зоны этих пластов. Это подтверждает сделанный ранее вывод о том, что метод БМ имеет весьма малую глубину исследования, особенно при повышающем проникновении промывочной жидкости.

Таким образом, анализ кажущихся сопротивлений, зарегистриро-

ванных различными зондами в карбонатных коллекторах, показывает, что в них возможно образование весьма глубоких зон проникновения промывочной жидкости. При этом глубинность применяемых ныне методов электрометрии, как правило, недостаточна для получения истинного представления о сопротивлении неизмененного коллектора за зоной глубокого проникновения. В то же время четырехэлектродные градиент-зонды благодаря повышенной глубинности исследования и относительно малому влиянию экранирования позволяют получать кажущиеся сопротивления, максимально приближенные к удельным, по крайней мере для водонасыщенных коллекторов. Причем ниже будет показано, что этот вывод справедлив также и для нефтенасыщенных коллекторов.

Одним из весьма широко распространенных способов комплексной интерпретации материалов электро- и радиометрии скважин в карбонатном разрезе является так называемый способ нормализации [21, 33], заключающийся в совмещении преобразованной в логарифмический масштаб диаграммы сопротивления с кривой НГМ. Для достижения наилучших результатов необходимо, чтобы используемый для нормализации метод электрометрии регистрировал кажущиеся сопротивления, максимально приближенные к удельным.

Так как приведенные выше материалы свидетельствуют о том, что четырехэлектродные градиент-зонды большого размера регистрируют кажущиеся сопротивления, в наибольшей степени свободные от искажающего влияния зоны проникновения, была предпринята попытка нормализовать кривую КС четырехэлектродного градиент-зонда А25М0,5Н25В. С этой целью в скв. 2312 Акташской площади был выбран заведомо известный водоносный интервал, на котором и была проведена нормализация.

На рис. 66 нормализованные кривые КС зонда А25М0,5Н25В и НГМ приведены в сопоставлении с нормализованными кривыми ИМ и НГМ. Как видно из этого рисунка, нормализованная кривая КС четырехэлектродного градиент-зонда на большей части рассматриваемого интервала совпадает с кривой НГМ значительно лучше, чем кривая метода ИМ. Только на отдельных участках разреза наблюдается превышение кривой НГМ над кривой сопротивления (интервалы 757,2–763,4; 773,2–790,0; 806,0–811,6 м), обусловленное, по-видимому, изменением типа порового пространства коллекторов по сравнению с теми участками разреза, по которым определялся модуль нормализации.

С целью проверки этого предположения кривая НГМ на участках расхождения была перестроена в кривые сопротивления, названные синтетическими, по следующей методике.

Сначала по диаграмме НГМ в точках, расположенных через 0,4 м, определялись численные значения k_{II} НГМ. Затем по зависимости $P_{II} = f(k_{II})$ для предполагаемого типа порового пространства в тех же

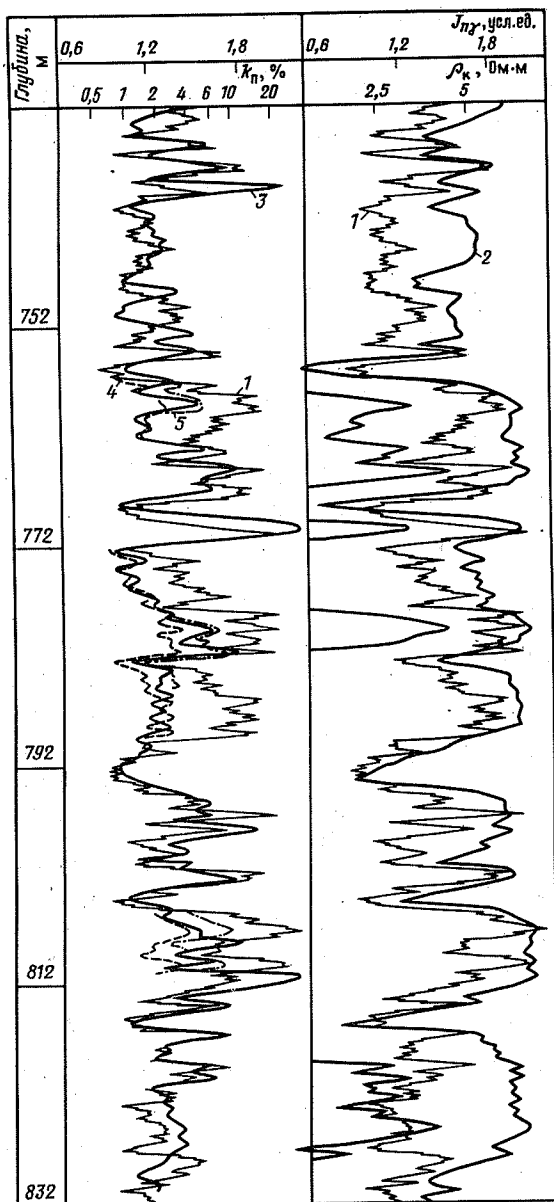


Рис. 66. Нормализованные кривые электрометрии и НГМ:
 1 – НГМ; 2 – ИМ; 3 – зонда А25М0,5Н25В; 4, 5 – синтетические

точках находились величины P_{Π} , по которым с помощью выражения (83) вычислялось удельное сопротивление водонасыщенного пласта ρ_{Π} . По найденным значениям ρ_{Π} строилась синтетическая кривая, которая наносилась совместно с нормализованной кривой КС. Хорошее их совмещение свидетельствует о том, что в данном интервале залегает коллектор с поровым пространством именно того типа, в предположении о котором для вычисления ρ_{Π} была использована выбранная зависимость $P_{\Pi} = f(k_{\Pi})$. Если построенная синтетическая кривая плохо совпадала с нормализованной кривой КС, то по описанной методике строилась другая синтетическая кривая с использованием зависимости $P_{\Pi} = f(k_{\Pi})$ для коллектора с другим типом порового пространства. Таким образом, для каждого участка разреза, на котором наблюдаются расхождения нормализованных кривых КС и НГМ, зависимость $P_{\Pi} = f(k_{\Pi})$ подбиралась так, чтобы синтетическая кривая, построенная по вычисленным значениям ρ_{Π} , наилучшим образом совместилась с нормализованной кривой КС.

Кривая 4 на рис. 6б была построена с использованием зависимости $P_{\Pi} = f(k_{\Pi})$ для сильно трещиноватых рыхлых известняков со структурным коэффициентом $m_0 = 1,6$, а кривая 5 — для известняков средней плотности с межзерновой и трещинно-каверновой пористостью ($m_0 = 2$). В зависимости от того, с какой из них совмещается нормализованная кривая КС, в рассматриваемой части разреза можно выделить интервалы залегания трещинных рыхлых и трещинно-каверновых известняков.

Хорошее совпадение синтетических кривых сопротивления с нормализованной кривой КС зонда А25М0,5N25В подтверждает соображение о том, что регистрируемые им ρ_k близки к истинным удельным сопротивлениям пород.

Не останавливаясь более на других примерах, отметим, что практически в каждой скважине, исследованной четырехэлектродными градиент-зондами большого размера, либо выявлены пропущенные стандартным комплексом ГИС из-за глубокого проникновения промывочной жидкости нефтеносные пласты, либо исключены ложные заключения о нефтенасыщенности водоносных пластов.

§ 3. РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Большое число скважин, исследованных четырехэлектродными градиент-зондами большого размера, позволило провести статистическую обработку диаграмм по методике М.Г. Латышовой и Е.А. Неймана [32] и количественно оценить их эффективность при разделении коллекторов на нефте- и водонасыщенные в сравнении с некоторыми методами стандартной электротометрии.

При формировании массива данных для обработки использовались терригенные и карбонатные коллекторы турнейского, серпуховского и башкирского ярусов, бобриковского, тульского и верейского горизонтов мощностью в основном от 1 до 4 м без разделения их по литологии и типу порового пространства (хотя гранулярные коллекторы преобладали) с надежно установленным характером насыщения. Последний определялся по результатам опробования, а в тех случаях, когда они отсутствовали, — по данным однозначной интерпретации комплекса ГИС, подтвержденным материалами СКО, газометрии и т.п.

Статистической обработке подвергались диаграммы четырехэлектродного градиент-зонда А25М0,5Н25В, стандартного потенциал-зонда В7,5А0,75М и метода ИМ (6Ф0,75). Материалы метода БМ вследствие заведомо малой глубинности исследования не использовались, а БЭЗ в рассматриваемой части разреза в большинстве случаев не проводилось.

Объем выборки для разных методов несколько различался и составлял для четырехэлектродного градиент-зонда 132 нефтеносных и 94 водоносных пласта, для потенциал-зонда — 123 и 95 и для метода ИМ — 131 и 86 пластов соответственно.

Обработка диаграмм четырехэлектродного градиент-зонда заключалась в отсчете против выделенных пластов кажущихся сопротивлений и построении по ним графиков интегральных функций распределения ($\Phi(\rho_{фл})$) для заведомо известных нефтеносных и водоносных пластов. По кривым стандартного потенциал-зонда и метода ИМ предварительно с помощью соответствующих двухслойных палеток определялись удельные электрические сопротивления.

Для учета влияния на сопротивление коллекторов коэффициента пористости кажущиеся сопротивления, отсчитанные с диаграмм четырехэлектродного зонда, и удельные сопротивления, полученные в результате интерпретации кривых стандартного потенциал-зонда и метода ИМ, умножались в соответствии с (83) на значение коэффициента пористости в квадрате ($k_{п}^2$), которое определялось по данным метода НГМ. По полученным в результате этого величинам, характеризующим сопротивление флюида, насыщающего пласты-коллекторы, были построены кривые интегральных функций распределения (рис. 67). Таким образом, для четырехэлектродного градиент-зонда графики интегральных функций распределения были построены по кажущимся, а для потенциал-зонда и метода ИМ — по удельным сопротивлениям флюида.

Как следует из рассмотрения рис. 67, наибольшей эффективностью (ef) при расчленении пластов на нефте- и водонасыщенные обладает четырехэлектродный градиент-зонд А25М0,5Н25В ($ef = 93,4\%$), тогда как потенциал-зонд В7,5А0,75М и метод ИМ (6Ф0,75) при решении указанной задачи имеют эффективность 73,7 и 74 % соответственно. Так

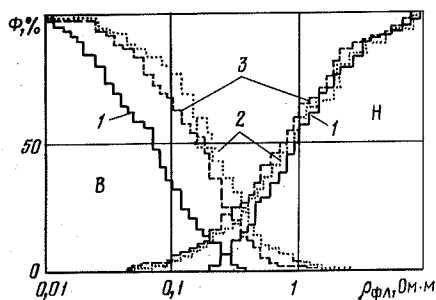


Рис. 67. Графики интегральных функций распределения сопротивления флюида нефте- и водонасыщенных коллекторов для четырехэлектродного градиент-зонда А25М0,5N25В (1), потенциал-зонда В7,5А0,75М (2) и зонда ИМ 6Ф0,75 (3)

как в качестве параметра, определяющего характер насыщения пласта, для четырехэлектродного зонда использовалось кажущееся сопротивление, а для потенциал-зонда и метода ИМ — удельное сопротивление, то, исходя из приведенных численных данных, можно утверждать, что кажущееся сопротивление, измеряемое четырехэлектродным градиент-зондом большого размера, с точки зрения разделения пластов по характеру насыщающего флюида является значительно более информативным, чем удельное сопротивление, определенное по результатам измерений потенциал-зондом и методом ИМ. Одновременно это свидетельствует о близости кажущегося сопротивления, регистрируемого четырехэлектродным градиент-зондом большого размера, к истинному удельному сопротивлению неизменной части пласта. Объясняется все это недостаточно большой глубиной исследования потенциал-зонда и метода ИМ, вследствие чего их показания определяются в основном параметрами зоны проникновения.

При анализе рис. 67 обращает на себя внимание такой факт: графики интегральных функций распределения рассматриваемых методов для нефтеносных пластов (на рисунке область Н) сравнительно хорошо совпадают друг с другом, особенно в области высоких значений использованного для разделения параметра ($\rho_{фл}$), тогда как для водоносных (область В) такое совпадение наблюдается только у стандартного потенциал-зонда и метода ИМ, а график четырехэлектродного градиент-зонда располагается значительно ниже.

Отмеченная закономерность позволяет сделать вывод о том, что повышающее проникновение в водоносные пласты-коллекторы имеет существенно большую глубину по сравнению с понижающим проникновением в нефтеносные пласты, что вполне согласуется с известными данными о различной фазовой проницаемости нефте- и водонасыщенных коллекторов. В результате этого на диаграммах относительно малоглубинных методов электрометрии водоносные пласты характеризуются повышенными сопротивлениями. Все это приводит к тому, что доля ошибочных заключений о нефтенасыщенности водоносных пластов, сделанных на основании интерпретации диаграмм потенциал-

зонда и метода ИМ, существенно больше, чем доля пропущенных этими методами (из-за понижающего проникновения) нефтеносных пластов.

Отметим еще одну закономерность, отчетливо проявившуюся на рис. 67.

Кривые интегральных функций распределения разных методов для нефтеносных пластов сравнительно хорошо совпадают, особенно в области высоких значений использованного для разделения параметра. При увеличении величины разделяющего параметра интегральные функции распределения зонда В7,5А0,75М и метода ИМ, с одной стороны, и четырехэлектродного градиент-зонда, с другой, все больше и больше расходятся, причем последняя все время располагается ниже двух других. Объясняется это тем неоднократно отмечавшимся многими исследователями фактом, что в слабонефтенасыщенных коллекторах зачастую образуются зоны повышающего проникновения, в результате чего малоглубинные методы электрометрии и регистрируют в таких коллекторах повышенные сопротивления. Судя по тому, что образование зон повышающего проникновения в слабонефтенасыщенных коллекторах четко отразилось на кривых интегральных функций распределения, явление это имеет не случайный, а систематический характер. При этом вероятность образования зоны повышающего проникновения в нефтенасыщенном пласте, а также ее глубина, по-видимому, возрастают с уменьшением коэффициента нефтенасыщения.

Следует отметить, что если бы графики интегральных функций распределения были построены с учетом литологии и структуры порового пространства, то выявленные с их помощью закономерности проявились бы еще нагляднее.

Помимо построения интегральных функций распределения, по 77 пластам, подвергшимся прямому опробованию в колонне, был вычислен коэффициент подтверждаемости геофизических заключений, сделанных с помощью диаграмм, зарегистрированных четырехэлектродными градиент-зондами большого размера, который оказался равным 94,3 %. Это с большой точностью совпадает с определенной выше эффективностью метода при разделении пластов-коллекторов на нефте- и водонасыщенные.

В целом анализ результатов измерений четырехэлектродными градиент-зондами большого размера, выполненных в большом числе скважин, и приведенные цифры доказывают их высокую эффективность при определении характера насыщения коллекторов с глубокими зонами проникновения промывочной жидкости. При этом особенно ценно то, что указанная задача успешно решается даже в случае маломощных коллекторов, залегающих в условиях сложного геологического разреза, представленного частым чередованием пород разного удельного сопротивления.

§ 4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНЫМИ ГРАДИЕНТ-ЗОНДАМИ БОЛЬШОГО РАЗМЕРА

Изучение экономической эффективности геофизических работ в целом и отдельных геофизических методов имеет большое практическое значение. Знание основных экономических показателей отдельных методов позволяет сравнивать их между собой и служит технико-экономическим обоснованием при выборе наиболее рационального комплекса для решения различных геологических задач.

Однако при практическом определении экономической эффективности не только отдельных методов, но и всей геофизической службы в целом возникает много трудностей, связанных с особенностями процесса геофизических исследований и информационным характером получаемых результатов. По существу, до настоящего времени нет достаточно удовлетворительной методики для оценки и анализа экономической результативности геофизических работ.

Обычно экономическую эффективность геофизических работ рассматривают в двух аспектах [23]:

1) экономическая эффективность как прибыль, выраженная в рублях, которую получает народное хозяйство при внедрении нового метода за счет более рационального использования всех производственных ресурсов: живого труда, материалов, капитальных вложений и т.д.;

2) экономическая эффективность как прибыль за счет повышения геологической эффективности геофизических работ, т.е. за счет повышения надежности геофизических заключений и уменьшения тем самым непроизводительных затрат.

В приводимых расчетах экономическая эффективность четырехэлектродных градиент-зондов большого размера определялась в сравнении с существующим методом КИИ-146, а под экономическим эффектом понималась прибыль за счет снижения себестоимости работ.

В качестве показателя экономической эффективности [35] рекомендуется использовать годовой экономический эффект (определяемый на годовой объем производства новой техники в расчетном году). Однако при оценке методов ГИС в связи с заказным характером работ целесообразнее производить расчет на одну скважину.

Годовой экономический эффект определяется путем сопоставления приведенных затрат по базовой (Z_1) и новой (Z_2) технике:

$$\mathcal{E} = (Z_1 - Z_2)A, \quad (84)$$

где A – годовой объем производства продукции (работы), производимой с помощью нового метода в натуральных единицах. Очевидно, что на единицу продукции

$$\mathcal{E} = Z_1 - Z_2. \quad (85)$$

Приведенные затраты определяются как сумма себестоимости и нормативной прибыли:

$$З = С + E_{\text{н}}K, \quad (86)$$

где C – себестоимость единицы продукции (в руб.); K – удельные капитальные вложения в производственные фонды; $E_{\text{н}}$ – нормативный коэффициент, единый для всех областей народного хозяйства и равный 0,15.

Метод исследования скважин четырехэлектродными градиент-зондами большого размера, для которого рассчитывается экономическая эффективность, позволяет разделить коллекторы на нефте- и водонасыщенные по величине кажущегося сопротивления при наличии глубоких зон проникновения промывочной жидкости. Существующими геофизическими методами эта задача в настоящее время надежно решается далеко не всегда, особенно в карбонатных коллекторах. Поэтому в таких случаях для определения истинного характера насыщения коллекторов часто используется метод КИИ-146. Именно поэтому последний и был взят в качестве базового при подсчете экономической эффективности четырехэлектродных градиент-зондов большого размера.

Поскольку при использовании метода КИИ-146 дополнительных капитальных вложений не требуется, то в формуле (86) $K = 0$ и тогда

$$З_1 = C_1. \quad (87)$$

Будем считать, что в каждой скважине методом КИИ-146 испытывается только по одному интервалу (объекту). Тогда, учитывая стоимость испытаний одного объекта, равную 781,27 руб., приведенные затраты на одну скважину по базовому методу

$$З_1 = C_1 = 781,27 \text{ руб.}$$

При исследованиях четырехэлектродными градиент-зондами измерения производятся поочередно тремя зондами различной длины на всем продуктивном интервале. Последний составляет в среднем 400 м и залегает на глубинах 800–1200 м. Поэтому себестоимость исследований четырехэлектродными градиент-зондами C_2 на одну скважину складывается из стоимости измерений тремя зондами в интервале 400 м и стоимости спуско-подъемных операций до глубины 1200 м.

Так как себестоимость измерений составляет 0,042 руб., а спуско-подъемных операций – 0,015 руб. за 1 м, стоимость измерений в одной скважине будет равна $400 \text{ м} \cdot 3 \cdot 0,042 \text{ руб.} = 50,4 \text{ руб.}$; спуско-подъемных операций $1200 \text{ м} \cdot 0,015 \text{ руб.} = 18 \text{ руб.}$, а полная стоимость всего объема работ четырехэлектродными градиент-зондами

$$C_2 = 50,4 \text{ руб.} + 18 \text{ руб.} = 68,4 \text{ руб.}$$

Капитальные вложения на разработку метода четырехэлектродных градиент-зондов большого размера составили примерно 200 тыс. руб., а исследовано им на сегодняшний день свыше 400 скважин. Следовательно, удельные капитальные вложения в расчете на одну скважину

$$K = 200\,000 \text{ руб.} : 400 \text{ скв.} = 500 \text{ руб.}$$

Подставляя полученные данные в формулу (86), определим приведенные затраты для четырехэлектродных градиент-зондов большого размера

$$Z_2 = 68,4 \text{ руб.} + 0,15 \cdot 500 \text{ руб.} = 144,4 \text{ руб.}$$

Используя формулу (85), получим их экономическую эффективность при исследовании одной скважины

$$\Theta = 721,27 \text{ руб.} - 144,4 \text{ руб.} = 576,87 \text{ руб.}$$

При подсчетах экономического эффекта типовой методикой [35] предусматривается учет в составе капитальных вложений единовременных затрат (со знаком +), необходимых для создания нового метода и прибыли (со знаком -) от применения нового метода в период, предшествующий расчетному году.

Дополнительных единовременных затрат на разработку метода исследования скважин четырехэлектродными градиент-зондами большого размера, кроме капитальных вложений, не требуется. В то же время уже в процессе его опробования, а затем и при массовом исследовании скважин практически в каждой из них четырехэлектродными градиент-зондами было выявлено как минимум по одному пропущенному стандартными методами ГИС нефтенасыщенному пласту-коллектору. Суммарная добыча нефти только по двум из них составила порядка 100 тыс. т.

Допустим, что по одному пропущенному нефтенасыщенному пласту-коллектору четырехэлектродными градиент-зондами обнаружено только в 10 % всех исследованных этим методом скважин. Причем в каждой из них за счет этого за все время эксплуатации получено дополнительно только по 10 тыс. т нефти. Тогда суммарное количество дополнительно добытой нефти

$$Q = 10\,000 \text{ т} \cdot 40 \text{ скв.} = 400 \text{ тыс. т.}$$

Прибыль II от дополнительно добытой нефти равна произведению ее количества на оптовую цену. Приняв последнюю равной 30 руб/т, получим общую сумму дополнительной прибыли

$$\Pi = 400 \text{ тыс. т} \cdot 30 \text{ руб/т} = 12 \text{ млн. руб.}$$

При расчете приведенных затрат для четырехэлектродных градиент-зондов из удельных капитальных вложений нужно вычесть прибыль от добытой нефти, приходящуюся на одну скважину. Тогда приведенные затраты на одну скважину будут определяться следующим образом:

$$Z_2 = C_2 = 0,15 \left(K - \frac{\Pi}{400 \text{ скв.}} \right) = 68,4 \text{ руб.} + 0,15 (500 \text{ руб.} - \frac{12 \text{ млн. руб.}}{400 \text{ скв.}}) = -4356,6 \text{ руб.}$$

Экономический эффект от применения четырехэлектродных градиент-зондов большого размера с учетом прибыли, полученной за счет добытой нефти,

$$\Theta = Z_1 - Z_2 = 781,27 \text{ руб.} - (-4356,6 \text{ руб.}) = 5137,87 \text{ руб.}$$

Таким образом, даже без учета стоимости нефти, добытой из пластов-коллекторов, выявленных четырехэлектродными градиент-зондами, экономия средств от использования последних только по одной скважине составляет (по сравнению с методом КИИ-146) около 600 руб. Если же стоимость нефти, добытой из пластов, пропущенных стандартным комплексом ГИС, но обнаруженных четырехэлектродными зондами, хотя бы в минимальной степени учитывать, то величина экономии резко возрастает. Совершенно очевидно, что при увеличении количества скважин, исследованных четырехэлектродными градиент-зондами, экономический эффект от их использования также будет увеличиваться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Б.Л. Изучение карбонатных коллекторов геофизическими методами. — М.: Недра, 1979. — 200 с.
2. Альпин Л.М. Асимптоты кривых каротажного зондирования. // Изв. ВУЗов. — Сер. Геология и разведка. — 1973. — № 6. — С. 122 — 129.
3. Альпин Л.М. Определение поперечного удельного сопротивления пластов по измерениям в скважинах // Изв. ВУЗов. — Сер. Геология и разведка. — 1978. — № 4. — С. 81 — 95.
4. Альпин Л.М. Каротаж истинных (поперечных) сопротивлений // Изв. ВУЗов. — Сер. Геология и разведка. — 1979. — № 3. — С. 99 — 110.
5. Альпин Л.М. Метод вторичных зарядов // Прикладная геофизика. — М.: Недра, 1981. — Вып. 99. — С. 124 — 138.
6. Альпин Л.М., Бондаренко М.Т. Асимптоты экстремальных кривых каротажного зондирования // Прикладная геофизика. — М.: Недра, 1978. — Вып. 90. — С. 170 — 175.
7. Ахмадуллин Ф.А., Дикгоф Ю.А. Лабораторные исследования процесса фильтрации глинистого раствора через проницаемую перегородку // Методика и интерпретация геофизических наблюдений. — Казань: Изд. Казанского госуд. ун-та, 1974. — Вып. 6. — С. 53 — 64.
8. Басин Я.Н., Новгородов В.А., Петерсилье В.И. Оценка подсчетных параметров газовых и нефтяных залежей в карбонатном разрезе по геофизическим данным. — М.: Недра, 1987. — 160 с.
9. Боярчук А.Ф. Результаты экспериментального изучения проникновения глинистых растворов в карбонатные коллекторы // Прикладная геофизика. — М.: Недра, 1979. — Вып. 95. — С. 190 — 199.
10. Волков Э.Я. Использование методов электротометрии для оценки размеров сверхглубоких зон проникновения фильтрата бурового раствора в коллекторы // Вопросы методики исследования и интерпретации промыслово-геофизических материалов в разрезе скважин Тюменской области. — Труды ЗапСибНИГНИ. — Тюмень: 1974. — Вып. 77. — С. 59 — 72.
11. Волков Э.Я. Закономерности изменения кривых БКЗ при сверхглубоких зонах проникновения фильтрата бурового раствора в коллекторы // Методика разведки и промыслово-геофизических исследований газонефтяных месторождений Тюменской области. — Труды ЗапСибНИГНИ. — Тюмень: 1975. — Вып. 106. — С. 143 — 150.
12. Временное методическое руководство по определению подсчетных параметров геофизическими методами для подсчета запасов нефти и газа. — М.: Изд. МИНГ, 1979. — 512 с.
13. Дахнов В.Н. Состояние и пути совершенствования геофизических методов изучения карбонатных коллекторов // Геофизические исследования нефтяных и газовых скважин. — М.: Недра, 1971. — С. 65 — 77.
14. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. — М.: Недра, 1975. — 344 с.
15. Дахнов В.Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин. — М.: Недра, 1981. — 344 с.
16. Дембицкий С.И., Букки Л.Е. О количественной оценке последствий некачественных геофизических заключений // Техника и технология геофизических исследований нефтяных скважин. — Уфа.: Изд. БашНИПИНефть, 1979. — С. 179 — 187.

17. Дикгоф Ю.А. Теоретические основы приближенного расчета кривых кажущегося сопротивления // Аппаратура, методика и интерпретация геофизических наблюдений. — Казань: Изд. Казанского госуд. ун-та, 1968. — Вып. 3. — С. 14 — 47.

18. Дикгоф Ю.А., Дикгоф А.Ю. Физико-математические основы гидродинамического способа выявления коллекторов в процессе бурения скважин // Методика и интерпретация геофизических наблюдений. — Казань: Изд. Казанского госуд. ун-та, 1974. — Вып. 6. — С. 16 — 52.

19. Дикгоф Ю.А., Яковлев Г.Е. Об асимптотических значениях ρ_k и предельных радиусах исследования при электрометрии скважин градиент-зондами бесконечно большого размера // Разведочная и промысловая геофизика. — Казань: Изд. Казанского госуд. ун-та, 1980. — С. 33 — 47.

20. Журавлев В.П., Терновская Л.А. Определение удельного сопротивления и характера насыщения коллекторов в пачках тонких пластов // Разведочная геофизика. — М.: Недра, 1972. — Вып. 49. — С. 105 — 111.

21. Залаяев Н.З. Интерпретация геофизических материалов путем функционального преобразования диаграмм и интеграции в информационные петрофизические системы // Припятская впадина. Геофизические исследования скважин. — Труды БелНИГРИ. — Минск: 1976. — С. 22 — 37.

22. Заслонов И.М. Каротаж скважин, основанный на измерении затухания электромагнитного поля // Прикладная геофизика. — М.: Недра, 1972. — Вып. 67. — С. 195 — 203.

23. Зверев Г.Н., Дембицкий С.И. Оценка эффективности геофизических исследований скважин. — М.: Недра, 1982. — 224 с.

24. Ильинский В.М. Боковой каротаж. — М.: Недра, 1971. — 144 с.

25. Ильинский В.М., Лимбергер Ю.А. Геофизические исследования коллекторов сложного строения. — М.: Недра, 1981. — 208 с.

26. Ирбэ В.А., Демьяновский А.И. О целесообразности проведения электрометрических исследований сверхдлинными зондами в глубоких скважинах Тюменской области // Изучение нефтегазоносных толщ Западно-Сибирской равнины методами промысловой геофизики. — Труды ЗапСибНИГНИ. — М.: Недра, 1974. — Вып. 65. — С. 131 — 136.

27. Исследования в открытом стволе нефтяных и газовых скважин / Вендельштейн Б.Ю., Ильинский В.М., Лимбергер Ю.А., Козина З.К. Под ред. Н.А. Савостьянова. — М.: Недра, 1984. — 230 с.

28. Итенберг С.С., Шнурман Г.А. Интерпретация результатов каротажа сложных коллекторов. — М.: Недра, 1984. — 256 с.

29. Киркинская В.Н., Смехов Е.М. Карбонатные породы-коллекторы нефти и газа. — Л.: Недра, 1981. — 255 с.

30. Кривко Н.Н., Шароварин В.Д., Широков В.Н. Промыслово-геофизическая аппаратура и оборудование. — М.: Недра, 1981. — 280 с.

31. Латышова М.Г., Дьяконова Т.Ф. Оценка воспроизводимости определений истинных удельных сопротивлений неизменной части пласта и зоны проникновения по данным бокового электрического зондирования // Нефтегазовая геология и геофизика: Реф. научн.-техн. сб. — 1979. — № 9. — С. 28 — 32.

32. Латышова М.Г., Нейман Е.А. Количественная оценка полезности методики разделения объектов на два класса // Геофизические исследования нефтяных и газовых скважин. — Труды МИНГип им. Губкина. — М.: Недра, 1971. — С. 165 — 169.

33. Масюков В.В. Комплексная интерпретация результатов геофизических исследований скважин // Припятская впадина. Оценка параметров нефтеносных

пластов. — Труды БелНИГРИ. — Минск: 1974. — С. 30 — 35.

34. Меррик Б.Р., Попов В.В. О радиусе исследования каротажа сопротивлений при пересечении контакта пород скважиной // Изв. ВУЗов. — Сер. Геология и разведка. — 1980. — № 3. — С. 108 — 113.

35. Методика (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. // Экономическая газета, 1977. — № 10.

36. Михайлов Н.Н., Яницкий П.А. Численное исследование динамики водонасыщения при формировании зоны проникновения в продуктивных пластах // Прикладная геофизика. — М.: Недра, 1980. — Вып. 98. — С. 168 — 177.

37. Обоснование комплекса методов и выбор зондов для определения электрических параметров пластов и зоны проникновения / Плюснин М.И., Малышев Д.А., Зефирова Н.Н. и др. // Прикладная геофизика. — М.: Недра, 1977. — Вып. 96. — С. 126 — 136.

38. Орлов Л.И., Ручкин А.В., Свехнушин Н.М. Влияние промывочной жидкости на физические свойства коллекторов нефти и газа. — М.: Недра, 1976. — 88 с.

39. Павлова Л.И., Санто К.Л., Чадаев Е.В. Решение прямой задачи для зондов БКЗ с реальными размерами электродов // Прикладная геофизика. — М.: Недра, 1980. — Вып. 97. — С. 209 — 215.

40. Полшков М.К., Ярмахов И.Г. Решение задачи формирования зоны проникновения фильтра глинистого раствора в нефтегазоносных пластах // Прикладная геофизика. — М.: Недра, 1978. — Вып. 93. — С. 165 — 172.

41. Сидорчук А.И. Теоретические кривые кажущегося сопротивления для реальных зондов // Разведочная геофизика. — М.: Недра, 1978. — Вып. 80. — С. 116 — 119.

42. Чукин В.Т., Бондаренко М.Т., Островский В.И. Повышение эффективности бокового каротажа // Прикладная геофизика. — М.: Недра, 1976. — Вып. 83. — С. 189 — 197.

43. Яковлев Г.Е. Сравнительный анализ характеристик зондов электрического каротажа // Прикладная геофизика. — М.: Недра, 1981. — Вып. 99. — С. 162 — 169.

44. Яковлев Г.Е., Хайретдинов Р.Ш., Излиев Л.А. Определение ВНК в карбонатных коллекторах при наличии глубокого проникновения бурового раствора // Нефтегазовая геология и геофизика: Реф. научн.-техн. сб. — 1981. — № 11. — С. 25 — 28.

45. Ярмахов И.Г., Логинов И.В., Сохранов Н.Н. Численное решение задачи формирования зоны проникновения // Прикладная геофизика. — М.: Недра, 1977. — Вып. 89. — С. 135 — 142.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I. Физико-геологическое обоснование применения градиент-зондов большого размера	6
§ 1. Состояние изучения коллекторов со сложным строением порового пространства	6
§ 2. Сравнительный анализ характеристик некоторых зондов электротриемрии	12
§ 3. Условия создания квазиоднородного электрического поля установками с конечными разносами питающих электродов	19
Глава II. Теория электротриемрии скважин в „нормальном” поле	28
§ 1. Асимптотические значения ρ_K и предельные радиусы исследования градиент-зондов	28
§ 2. Характеристики градиент-зондов бесконечно большого размера	40
§ 3. Глубинность исследования градиент-зондов конечного размера	44
Глава III. Влияние реальных условий измерения на показания градиент-зондов большого размера	51
§ 1. Ствол скважины	52
§ 2. Конечное расстояние между парными электродами	57
§ 3. Экранирование	59
§ 4. Анизотропия разреза	64
Глава IV. Физическое и математическое моделирование	72
§ 1. Электролитическое моделирование	72
§ 2. Моделирование на электроинтеграторе ЭКСМ	82
§ 3. Результаты моделирования на ЭВМ	87
Глава V. Интерпретация диаграмм КС четырехэлектродных градиент-зондов большого размера	91
§ 1. Определение границ пластов	92
§ 2. Определение удельного сопротивления пластов	93
§ 3. Определение характера насыщения коллекторов	109
Глава VI. Техническая реализация измерений в скважинах четырехэлектродными градиент-зондами большого размера	113
§ 1. Условия измерений и основные требования к аппаратуре	113
§ 2. Описание аппаратуры	120
§ 3. Результаты испытаний аппаратуры	126
§ 4. Возможность одновременной регистрации нескольких кривых КС разными по размеру четырехэлектродными градиент-зондами	128
Глава VII. Результаты исследования скважин четырехэлектродными градиент-зондами большого размера	132
§ 1. Краткая характеристика коллекторов карбонатных отложений Татарии	132
§ 2. Определение характера насыщения коллекторов	138
§ 3. Результаты статистической обработки измерений	166
§ 4. Экономическая эффективность измерений четырехэлектродными градиент-зондами большого размера	170
Список литературы	174

60 коп.

НЕДРА