Федеральное агентство по образованию Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Геофизические методы исследования»

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Электрические методы исследования скважин

по предмету «Геофизические методы исследования скважин»

для студентов горно-нефтяного факультета

В данном учебно-методическом пособии даны определения основных геолого-геофизических терминов, используемых специалистами специальностей и характеристика объекта геофизического исследования. Подробно представлены физические основы геофизических исследований электрометрии, включающие: скважин методами метод потенциалов собственной поляризации (ПС), каротаж сопротивления обычными зондами (КС), боковое каротажное зондирование (БКЗ), микрокаротаж (МКЗ), боковой каротаж (БК), боковой микрокаротаж (БМК), индукционный каротаж (ИК), высокочастотное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ). Определены применения конкретных электрических методов исследования области скважин, приведены факторы, влияющие на показания измеряемых параметров, и алгоритмы обработки и интерпретации.

Предназначено для студентов специальности «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых», но будет также полезно для студентов и магистрантов других специальностей горно-нефтяного факультета.

Составители: Орлинский Б.М., проф., д-р геол.-минерал. наук Шаймухаметова А.И., ст. преподаватель

Рецензент

Дворкин В.И., д-р тех. наук

© Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2008

ВВЕДЕНИЕ

Основным этапом разведки и разработки большинства месторождений полезных ископаемых является бурение скважин. С помощью скважин происходит эксплуатация месторождений нефти, газа, воды, каменной соли.

При бурении каждой скважины необходимо изучить ее геологический разрез: определить последовательность залегания и литологопетрографическую характеристику вскрытых горных пород, выявить в них наличие полезных ископаемых и оценить их содержание. Для этого в процессе бурения отбирают образцы горных пород (керн) и выносимые промывочной жидкостью (ПЖ) на устье скважины обломки пород (шлам). В нефтяных, газовых и гидрологических скважинах также проводят пробные испытания пластов. Однако получаемая при этом информация не дает полного представления о геологическом разрезе скважины.

При отборе керна свойства породы и насыщающей ее флюида несколько изменяются. Часть образцов во время разбуривания и подъема керна на поверхность разрушается (неполный вынос керна). Процент выноса керна из пористых пластов часто бывает очень малым, что затрудняет оценку пород, пересеченных скважиной, по керну. В то же время отбор керна и испытания пластов приводит к увеличению времени проходки. Поэтому стремятся максимально сократить отбор керна и количество испытаний пластов.

Трудности, связанные с получением керна, привели к созданию геофизических методов исследования скважин (*каротаж*), которые позволяют оперативно и достаточно полно решать вышеперечисленные задачи. Каротаж заключается в измерении вдоль ствола скважины при помощи прибора какой-либо физической величины, характеризующей свойства горных пород. Поэтому по его результатам можно получить представление о том, какие породы пройдены скважиной и каковы их особенности. В зависимости от изучаемых физических или химических, свойств пород различают следующие виды каротажа: электрический, радиоактивный, акустический, магнитный, термический, газовый, механический и др.

Данные каротажа оказывают существенную помощь в оценке характера пройденных скважиной пород и последовательности их залегания, позволяют обнаруживать полезные ископаемые. Наиболее благоприятные результаты дает каротаж нефтяных и газовых скважин. В большинстве случаев по его данным удается выделить пласты, в которых могут быть встречены нефть или газ (коллекторы), получить предварительную оценку их возможной нефтегазоносности и наметить перспективные объекты для опробования и эксплуатации. Каротаж нефтяных и газовых скважин позволяет во многих случаях обходиться без отбора керна в процессе бурения.

Учебно-методическое пособие посвящено методам электрического каротажа нефтегазовых скважин.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом геофизического исследования являются пласты, пересеченные скважиной.

Скважина – одна из форм горных выработок, цилиндрической формы, диаметр которой во много раз меньше ее длины. Наиболее распространенный диаметр скважины 200-220 мм. Горная выработка включает не только проходку ствола скважины, но и изучение геологического разреза, поэтому геофизические исследования проводятся во всех без исключения скважинах. В качестве разрушающего инструмента применяются долота различной конструкции. Долото устанавливается на конце колонны бурильных труб, при роторном бурении привод расположен на устье скважины, при турбинном бурении над долотом устанавливается турбина.

При проходке ствола скважины применяется промывочная жидкость, которая в большинстве случаев представляет глинистый раствор. Промывочная жидкость подается по колонне бурильных труб и по затрубному пространству выносится на поверхность. Основные назначения промывочной жидкости: выносить разбуренную породу на поверхность, охлаждать долото при проходке ствола скважины, при турбинном бурении обеспечивать работу турбины. Плотность промывочной жидкости задается из условия, чтобы давление на забое скважины было больше, чем пластовое давление. Пластовое давление определяется давлением, под которым находится жидкость в пустотном пространстве. Эта величина близка к величине гидростатического напора. При данном соотношении давления на забое и пластового давления исключается приток жидкости из пласта в процессе бурения.

Пласт – элемент разреза, толщина которого во много раз меньше площади его развития, резко отличающийся по составу от выше- и нижележащих отложений, имеющий две поверхности напластования (кровлю и подошву), четко выделяемый и коррелируемый в разрезе толщи и по площади месторождения.

Коллекторами называют пласты, представленные породами, способными содержать пластовые флюиды (нефть, газ и воду) и отдавать их при практически значимых перепадах давления. Основными свойствами коллекторов являются пористость и проницаемость.

Под *пористостью* горной породы понимают наличие в ней пустотного (емкостного) пространства (пор, каверн, трещин). Количественно пористость породы характеризуется коэффициентом пористости k_n , который равен отношению объёма всех пустот в горной породе V_n к её общему объёму V_{os} :

$$k_{\Pi} = \frac{V_{\Pi}}{V_{OF}}$$

Проницаемость – способность горной породы пропускать через себя, при практически наблюдаемых перепадах давления, жидкости и газы. Процесс фильтрации описывается законом Дарси $Q = k_{np}\Delta p$, где Q – дебит или расход жидкости, Δp – перепад давления в системе скважина–пласт, k_{np} – коэффициент проницаемости.

Существенным является влияние промывочной жидкости на объект исследования. В интервале коллекторов при $p_{3a\delta} > p_{nn}$ происходит проникновение водной фазы промывочной жидкости (фильтрата) в пласт, в котором образуется зона проникновения (ЗП) (рис.1.1). Условно зону проникновения считают концентрическим слоем с диаметром **D** и постоянным сопротивлением ρ_{3n} . Диаметр зоны проникновения **D** (эффективный диаметр) принимается из расчета, что его влияние на результаты измерений в неоднородной зоне проникновения эквивалентно фактическому диаметру проникновения. Обычно размеры зоны

проникновения составляют от 2–4 до 8 диаметров скважины.

В интервале коллектора происходит уменьшение диаметра скважины за счет выпадения глинистой фазы промывочной жидкости на стенки коллектора, образуется *глинистая корка*, толщина которой обычно от 5 до 20 мм. При контакте глин с промывочной жидкостью на водной основе за счет их разрушения наблюдается увеличение диаметра скважины в их интервале (образуются каверны).

В зоне проникновения фильтрат промывочной жидкости смешан с пластовой водой и её удельное сопротивление изменяется в радиальном направлении. Проникновение фильтрата может привести к повышению сопротивления пласта (повышающее проникновение). Это обыч-



Рис.1.1. Схема пласта коллектора, пересеченного скважиной:

1 — неизменная часть пласта, 2 — зона проникновения фильтрата промывочной жидкости диаметром D, 3 — промытая зона, 4 — глинистая корка, 5 — скважина, 6 — вмещающие породы

но наблюдается при проникновении пресного фильтрата в водоносные пласты, насыщенные более минерализованной водой, а также в нефтеносные пласты при их низкой нефтенасыщенности. Проникновение фильтрата в пласт может привести к снижению его сопротивления (понижающее проникновение). Это происходит, когда сопротивление фильтрата меньше, чем сопротивление воды, насыщающей поры породы, либо при проникновении фильтрата в нефтегазонасыщенные пласты вследствие вытеснения нефти и газа фильтратом.

Наиболее измененная влиянием проникновения часть пласта, расположенная непосредственно у стенки скважины называется *промытой зоной*. В этой зоне фильтрат промывочной жидкости практически полностью вытесняет подвижный пластовый флюид. С увеличением расстояния от стенки скважины объем фильтрата в единице объема породы постепенно уменьшается и сопротивление зоны проникновения ρ_{n3} достигает сопротивления неизмененной части пласта. Сопротивление промытой зоны ρ_{n3} водоносного пласта определяется обычно сопротивлением фильтрата промывочной жидкости и пористостью пласта. В промытой зоне нефтеносного пласта происходит замещение пластовой воды и нефти фильтратом промывочной жидкости, но в тонких порах и тупиках коллектора нефть частично сохраняется. Считается, что в промытой зоне содержится 20 – 35% остаточной нефти. В глинистых коллекторах, а также при большой вязкости нефти остаточная нефтенасыщенность может достигать и больших значений. В газоносных пластах остаточная газонасыщенность всегда больше остаточной нефтенасыщенности даже для очень вязких нефтей. Остаточную газонасыщенность принято считать равной 30%.

2. УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

За величину у*дельного электрического сопротивления* ρ (УЭС) горной породы принимают сопротивление куба породы с ребром 1 *м*, которое измеряется в омметрах ($O_{M}\cdot M$) $\rho = \frac{RS}{l}$, где R – омическое сопротивление, S – поперечное сечение и l – длина проводника. Величина, обратная удельному сопротивлению, – *удельная электрическая проводимость* $\sigma=1/\rho$, измеряется в C_{M}/M .

Сопротивление осадочных горных пород определяется сопротивлением породообразующих минералов и заполнителя пустотного пространства (нефть, газ, пластовая вода). Сопротивление породообразующих минералов бесконечно велико, например, для кварца составляет 10^{12} – 10^{14} *Ом*·*м*. Сопротивление нефти и газа также очень велико. Поэтому проводником тока в осадочных горных породах является пластовая вода.

Пластовые воды представляют собой водные растворы солей. Удельное сопротивление этих растворов зависит от концентрации солей, их химического состава и температуры. Чем выше концентрация солей при прочих равных условиях, тем ниже удельное сопротивление пластовой воды. С повышением температуры сопротивление водных растворов понижается, что объясняется увеличением подвижности ионов в электролитах.

$$\rho_2 = \rho_1 \left[1 + \alpha (T_1 - T_2) \right], \qquad (2)$$

где *α* – среднее значение *температурного коэффи циента электропроводности* при изменении температуры на 1°С, который для электролита *NaC1* равен 0,022; *ρ*² и *ρ*¹ удельные сопротивления электролита при температурах соответственно *T*₂ и *T*₁. Величина удельного сопротивления пласто-



Рис.2.1. Зависимость УЭС от минерализации пластовой воды при T=50°С

вой воды обратно пропорциональна концентрации солей (рис. 2.1). Минерали-

.1)

зация пластовой воды на месторождениях Волго-Уральской области в основном изменяется в пределах $160 - 280 \ z/\lambda$, и удельное сопротивление составляет 0,03-0,05 *Ом*·*м*. На месторождениях Западной Сибири минерализация пластовой воды значительно меньше $20-25 \ z/\lambda$, удельное сопротивление 0,1-0,2 *Ом*·*м*. На Северном Кавказе содержание солей в воде единицы z/λ , сопротивление пластовой воды 0,7 *Ом*·*м*.

При разработке нефтяных месторождений применяется внутриконтурное заводнение, при котором в пласт из открытых водоемов закачивается пресная вода сопротивлением до 10 *Ом*·*м*.

Удельное электрическое сопротивление водоносного пласта

Сопротивление водоносных пластов $\rho_{B\Pi}$ зависит от минерализации (сопротивления ρ_B) пластовой воды и параметров токопроводящих путей: величины пористости (k_{Π}) и структуры порового пространства (структурный коэффициент *F*): $\rho_{B\Pi} = f(\rho_B, k_{\Pi}, F).$

Форму пустотного пространства можно характеризовать отношением максимального сечения порового канала к минимальному сечению. Для цилиндра это отношение равно 1 и увеличивается в зависимости от степени неоднородности каналов по их диаметру. При увеличении отношения максимального сечения к минимальному до 2; 5; 10 при постоянном объеме этих каналов, сопротивление водоносного пласта соответственно увеличится в 1,6; 6,8 и 25 раз.

Для характеристики водоносных пластов кроме сопротивления *рвп* используется *параметр пористости* (коэффициент относительного сопротивления):

$$\boldsymbol{P}_{\Pi} = \frac{\boldsymbol{\rho}_{B\Pi}}{\boldsymbol{\rho}_{B}}.$$
(2.2)

Этот параметр, в отличие от сопротивления пласта не зависит от минерализации воды, а определяется величиной пористости и структурой пустотного пространства

$$\boldsymbol{P}_{\Pi} = \frac{\boldsymbol{a}}{\boldsymbol{k}_{\Pi}^{m}}, \qquad (2.3)$$

где a – коэффициент, постоянный для данных отложений и изменяющийся в пределах 0,4 – 1,4; m – зависит от формы пустотного пространства, меняется от 1,3 до 2,5. Обычно для чистых гранулярных коллекторов с пористостью около 22% принимают

$$P_{\Pi} = \frac{1}{k_{\Pi}^2} . \tag{2.4}$$

Сопротивление водоносного пласта $\rho_{B\Pi} = P_{\Pi} \rho_{B}$, отсюда следует, насколько сильно при постоянной пористости влияет структура порового пространства на сопротивление водоносного коллектора. Удельное электрическое сопротивление водоносных пластов составляет единицы $O_{\mathcal{M}} \cdot \mathcal{M}$.

Удельное электрическое сопротивление нефтеносного пласта

Сопротивление нефти $10^9 - 10^{16} O_{M \cdot M}$, поэтому сопротивление нефтеносных пластов зависит от количества, минерализации и формы залегания связанной воды. По минерализации связанная вода близка к пластовой воде. Количество нефти и связанной воды в поровом пространстве характеризуется коэффициентами нефтенасыщенности (k_H) и водонасыщенности (k_B), $k_B = 1 - k_H$. Следовательно, сопротивление нефтеносного пласта во многом определяется коэффициентом водонасыщенности.

Для характеристики продуктивных коллекторов используется *параметр насыщения* (коэффициент увеличения сопротивления):

$$\boldsymbol{P}_{H} = \frac{\boldsymbol{\rho}_{H\Pi}}{\boldsymbol{\rho}_{B\Pi}}, \qquad (2.5)$$

где *рнп*, – сопротивление нефтеносного пласта, *рвп* – сопротивление того же пласта, если бы он был водонасыщенным.

Параметр насыщения зависит от коэффициента водонасыщенности

$$\boldsymbol{P}_{H} = \frac{\boldsymbol{b}}{\boldsymbol{k}_{B}^{n}}, \qquad (2.6)$$

где b – коэффициент постоянный для данного типа коллектора, n – определяется степенью смачиваемости скелета породы (формой залегания связанной воды), если степень смачиваемости коллектора не известна, то n принимается равным двум.

Сопротивление нефтенасыщенной породы можно выразить следующим образом (формула Арчи-Дахнова):

$$\boldsymbol{\rho}_{H\Pi} = \boldsymbol{P}_{H} \boldsymbol{P}_{\Pi} \boldsymbol{\rho}_{B} = \frac{a b}{k_{\Pi}^{m} k_{B}^{n}} \boldsymbol{\rho}_{B}. \qquad (2.7)$$

По форме залегания связанной воды различают гидрофильные и гидрофобные породы. В природных условиях в основном встречаются *гидрофильные* породы, в которых зерна скелета коллектора в той или иной степени обволакиваются связанной (неподвижной) водой. Коэффициент нефтенасыщенности таких пород обычно изменяется от 0,6 до 0,9 и соответственно, сопротивление нефтеносного пласта составляет от десятков до сотен $O_{M\cdot M}$. В *гидрофобных* породах пленка нефти обволакивает зерна скелета коллектора, а вода присутствует в виде капель в нефти и поэтому слабо влияет на величину сопротивления. Полностью гидрофобные породы встречаются редко, сопротивление таких пород достигает тысяч $O_{M\cdot M}$. Считается, что для большинства залежей нефти коллекторы частично гидрофильные, т.е. пленка воды прерывистая и связанная вода может залегать в тупиковых зонах на контакте зерен скелета.

С уменьшением коэффициента водонасыщенности уменьшается сечение токопроводящих каналов и соответственно увеличивается сопротивление. При одинаковом коэффициенте водонасыщенности с уменьшением степени смачиваемости коллектора сопротивление нефтеносного пласта увеличивается.

Ввиду высокого содержания в глинах связанной воды, глинистость влияет на сопротивление коллекторов. В случае водоносного коллектора сопротив-

ление двойного электрического слоя равно сопротивлению пластовой воды и рассеянная глинистость (пелитовая фракция) выступает в качестве заполнителя пустотного пространства, то есть ее влияние эквивалентно уменьшению пористости и, соответственно, сопротивление глинистых водоносных коллекторов будет больше по сравнению с чистыми коллекторами. С увеличением глинистости нефтеносного коллектора увеличивается количество связанной воды, двойной электрический слой пелитовой фракции выступает в качестве проводника тока. Поэтому сопротивление глинистого нефтеносного коллектора по сравнению с чистыми коллектором уменьшается.

Сопротивление глин и аргиллитов составляет от 2-3 до 6-7 *Ом*·*м* соответственно. Сопротивление плотных разностей, обычно представленных известняками, может достигать сотни и тысячи *Ом*·*м*.

Таким образом, *удельное электрическое сопротивление* пород является информативным параметром, позволяет дифференцировать коллекторы по газонефтеводонысыщенности и проводить литологическое расчленение разреза.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН

Электрический каротаж составляет основу комплекса геофизических исследований при изучении разрезов скважин, бурящихся на нефть и газ. Во всех скважинах, выходящих из бурения, по всему стволу выполняют стандартный электрический каротаж для литологического и стратиграфического расчленения и взаимной корреляции разрезов скважин. В интервалах, перспективных на нефть и газ, проводят детальные электрические исследования, включающие боковое каротажное зондирование (БКЗ), боковой каротаж (БК), индукционный каротаж (ИК), высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ), микрокаротаж обычными зондами и боковой микрокаротаж (БМК).

Задачами этих исследований являются: расчленение разреза на пласты с разными электрическими свойствами; изучение распределения удельного сопротивления в промытой зоне, зоне проникновения и в неизмененной части пласта; выделение пластов-коллекторов; определение подсчетных параметров продуктивных пластов.

Для интерпретации результатов электрического и других видов каротажа необходимо иметь данные об удельном сопротивлении промывочной жидкости, заполняющей ствол скважины. Измерения удельного сопротивления жидкости по стволу скважины проводятся также при контроле технического состояния скважин и гидрогеологических исследованиях. Для определения удельного сопротивления ПЖ используются скважинные и поверхностные *резистивиметры*. Скважиные резистивиметры бывают контактные и индукционные. И тот и другой тип представляют собой каротажные зонды (КС и ИК) малых размеров, конструкции которых позволяют учитывать только вклад сигнала из скважины и исключить сигнал из пласта.

Классификация электрических методов

Классификация электрических методов исследования скважин составлена по характеру происхождения изучаемого поля и его изменению во времени – частоте. По характеру происхождения изучаемого поля методы электрометрии скважин делятся на две большие группы – естественного и искусственного поля, а по частоте поля – на методы постоянного и переменного поля. Среди методов переменного поля следует различать низкочастотные и высокочастотные.

Стационарные естественные электрические поля исследуются методом потенциалов собственной поляризации горных пород (ПС).

На измерении характеристик искусственно созданного стационарного электрического поля основаны методы каротажа сопротивления обычными зондами (КС) и методы с фокусировкой тока – боковой каротаж (БК). Токовые электроды в этих методах питаются стабилизированным переменным током частотой 300 – 500 Гц.

Изучение искусственных переменных электромагнитных полей осуществляется индукционными методами: низкочастотными (частота питающего тока 20 – 250 кГи) и высокочастотными (0,8 – 14 *МГи*).

3.1. Метод потенциалов собственной поляризации

Большинство методов электрометрии изучают вызванные электрические поля, и только один метод потенциалов собственной поляризации (ПС) основан на изучении естественного электрического поля. Электродвижущая сила естественного поля ПС в скважинах обусловлена диффузией, которая возникает в результате разности концентраций солей в пластовой воде и промывочной жидкости. Обычно минерализация пластовой воды значительно больше минерализации промывочной жидкости.

Диффузионные потенциалы

При непосредственном контакте водных растворов электролитов различной концентрации происходит диффузия ионов из раствора большей концентрации в разбавленный раствор. Поскольку подвижности ионов неодинаковы, то менее концентрированный раствор приобретает по отношению к более концентрированному заряд, знак которого соответствует знаку заряда, перенесенного более подвижными ионами. В случае контакта растворов бинарного электролита на их границе возникает диффузионная разность потенциалов, электродвижущие силы (ЭДС) которых определяются уравнением Нернста

$$E_{\mathcal{A}} = \frac{RT}{F} \frac{n_{\kappa} u - n_{a} v}{n_{\kappa} \boldsymbol{z}_{\kappa} u + n_{a} \boldsymbol{z}_{a} v} ln \frac{C_{1}}{C_{2}}, \qquad (3.1)$$

здесь R – универсальная газовая постоянная, равная 8,314 $\Delta m/(monb \cdot K_{\Lambda})$; F – число Фарадея, приблизительно равное 96484 $K_{\Lambda}/monb$; T – абсолютная темпе-

ратура в K ($T=T_1+273^{\circ}C$, T_1 – температура раствора в °C); n_k , n_a – число катионов и анионов, на которое диссоциирует одна молекула электролита; z_k , z_a – валентность катиона и аниона; u, v – электролитические подвижности катиона и аниона, $C_{M} \cdot c_M^2 / MOAb$; C_1 , C_2 – концентрации электролита в двух растворах, $MOAb/\lambda$ ($C_1 > C_2$).

Пластовые воды различаются по составу солей, в большинстве случаев преобладает соль $NaC\ell$. Поэтому при моделировании обычно пластовая вода отождествляется с аналогичным по концентрации раствором $NaC\ell$. Для одновалентного электролита, когда $\boldsymbol{z}_k = \boldsymbol{z}_a = 1$ и $\boldsymbol{n}_k = \boldsymbol{n}_a = 1$, формула (3.1) принимает в

$$E_{\mathcal{A}} = \frac{RT}{F} \frac{u - v}{u + v} ln \frac{C_1}{C_2}.$$
(3.2)

Подставив в формулу (3.2) значения *R*, *F* при стандартных условиях *T*₁=18°C (*T*=291 K), заменив натуральный логарифм десятичным, получим

$$E_{\mathcal{A}} = 58 \frac{u-v}{u+v} lg \frac{C_1}{C_2}$$
 или $E_{\mathcal{A}} = 58 (N_k - N_a) lg \frac{C_1}{C_2}$, (3.3)

где $N_k = \frac{u}{u+v}$, $N_a = \frac{v}{u+v}$ числа переноса катионов и анионов. Числа переноса

характеризуют относительную подвижность катионов и анионов.

Из формулы (3.1) и (3.3) следует, что *обязательными условиями* возникновения диффузионной ЭДС являются различия концентрации растворов ($C_1 \neq C_2$) и подвижностей катионов и анионов ($u \neq v$). Если одно из этих условий не соблюдается, то диффузионная ЭДС отсутствует.

Выражение перед логарифмом в формулах (3.1) - (3.3) при данной температуре характеризуется постоянной величиной, которая называется коэффициентом диффузионного потенциала K_{A} . Величина K_{A} является функцией подвижностей ионов и при T=const зависит от химического состава контактирующих электролитов.

$$\boldsymbol{E}_{\mathcal{A}} = \boldsymbol{K}_{\mathcal{A}} \boldsymbol{l} \boldsymbol{g} \frac{\boldsymbol{C}_{1}}{\boldsymbol{C}_{2}}.$$
(3.4)

Для раствора *NaCl* подвижность аниона *Cl*⁻ примерно в 1,5 раза больше подвижности катиона *Na*⁺, в этом случае $(N_k - N_a) = -0,2$ и $K_a = -11,6$ мВ. Тогда при непосредственном контакте двух растворов *NaCl* различной минерализации $E_a = -11,6 lg \frac{C_1}{C_2}$.

Вследствие большей подвижности иона Cl^- по сравнению с подвижностью Na^+ при непосредственном контакте двух электролитов хлористого натрия менее концентрированный раствор приобретает отрицательный знак.

В рассматриваемой модели для диффузионного потенциала отсутствует пористая среда, которая в определенных условиях может существенно влиять на подвижности и соответственно числа переносов анионов и катионов. Для учета влияния пористой среды обычно используется модель двух растворов различной концентрации, разделенных пористой перегородкой, через которую будет происходить диффузия ионов из раствора большей концентрации в раствор меньшей концентрации. Возникающая при этом *диффузионно-адсорбционная ЭДС* может отличаться по величине и даже знаку от диффузионной ЭДС.

Величина диффузионно-адсорбционного потенциала зависит от структуры пористой перегородки. С изменением ее структуры, наблюдаемые значения диффузионно-адсорбционной ЭДС для двух растворов одной и той же соли различной концентрации изменяются от величины диффузионной ЭДС до предельного значения $E_{AA} = 58 lg \frac{C_1}{C_2}$. Это частный случай выражения (3.3) при $N_k=1$, $N_a=0$. По аналогии с формулой (3.4) диффузионно-адсорбционный потенциал выражают следующим образом

$$\boldsymbol{E}_{\mathcal{A}A} = \boldsymbol{K}_{\mathcal{A}A} \boldsymbol{l} \boldsymbol{g} \frac{\boldsymbol{C}_1}{\boldsymbol{C}_2}, \qquad (3.5)$$

где **К**_{дл} – коэффициент диффузионно-адсорбционного потенциала.

Основной причиной изменения величины и знака диффузионноадсорбционной ЭДС является изменение чисел переноса в поровых каналах капиллярных систем, вызванным влиянием двойного электрического слоя.

Двойной электрический слой

На границе раздела различных фаз (твердое тело – водный раствор электролита, скелет горной породы – пластовая вода) образуется двойной электрический слой. При контакте твердых частиц с раствором электролита на поверхности твердой фазы происходят частичная диссоциация вещества вследствие гидролиза и адсорбция твердой фазой ионов одного знака. При контакте кварца SiO_2 с минерализованной пластовой водой образуются молекулы кремневой кислоты H_2SiO_3 , которые диссоциируют на ионы $HSiO_3^-$ и H^+ . У большинства горных пород (кварцевых песков и песчаников, глин, многих видов известняков и доломитов) поверхность твердой фазы имеет **отрицательный заряд**. Эта поверхность составляет *внутреннюю обкладку* двойного электрического слоя (рис. 3.1, слой 1).

Внешняя обкладка двойного слоя состоит из адсорбированных катионов (слой 2) и диффузно распределенных в объеме катионов и анионов – диффузного слоя (слой 3). Такое распределение ионов во внешней обкладке обусловлено одновременным действием сил электростатического поля заряженной поверхности и молекулярно-кинетического движения ионов в свободном растворе (слой 4). Двойной электрический слой в целом является электрически нейтральной системой.



Рис. 3.1. Схема строения двойного электрического слоя на поверхности твердой фазы в водной среде (а) и изменение концентраций катионов (С_к) и анионов (С_а) по толщине двойного слоя (б):

 внутренняя обкладка двойного слоя, внешняя обкладка: 2 – слой адсорбированных ионов, 3 – диффузный слой, 4 – свободный раствор

Рассмотрим распределение катионов и анионов по толщине двойного электрического слоя (рис. 3.1, б). При отрицательном заряде поверхности твердой фазы адсорбционный слой представлен только катионами, концентрация которых в диффузном слое убывает в направлении от поверхности твердой фазы к свободному раствору, а концентрация анионов соответственно возрастает. Однако в целом число катионов в объеме диффузного слоя значительно превышает число анионов. Ионы диффузной части способны перемещаться, но их подвижность в несколько раз меньше подвижности ионов в свободном растворе. Катионы адсорбционного слоя, по-видимому, неподвижны.

В пористой среде мы имеем дело с цилиндрическими границами раздела в капиллярах, т.е. модель лучше представлять в виде щели, ширина которой близка к диаметру капилляра. По сравнению с рассмотренной плоской границей раздела в цилиндрическом капилляре структура двойного слоя несколько изменится благодаря электростатическому взаимодействию ионов диффузной обкладки.

В общем случае в диффузии принимают участие ионы свободного раствора в капиллярах пористой перегородки и подвижные катионы двойного слоя на поверхности капилляров. В этом случае понятие «число переноса» в отношении катионов и анионов сохраняет свой физический смысл, характеризуя долю электричества, переносимого определенным сортом ионов, однако оно расширяется по сравнению с трактовкой его применительно к диффузии электролитов в свободных растворах. Если в растворах бинарных одновалентных электролитов для диффузионной ЭДС числа переноса выражались отношениями $N_k = \frac{u}{u+v}$, $N_a = \frac{v}{u+v}$, то в рассматриваемом случае значения N_k и N_a для растворов тех же солей при наличии пористой перегородки будут иметь другой вид:

$$N_{k} = \frac{n'_{k} u' + n_{k} u}{n'_{k} u' + n_{k} u + n_{a} v}, \quad N_{a} = \frac{n_{a} v}{n'_{k} u' + n_{k} u + n_{a} v}, \quad (3.6)$$

здесь u' – подвижность катионов двойного слоя, n'_k – доля катионов двойного слоя от общего числа ионов в единице объема капилляров. При этом подвиж-

ность анионов, образующих внутреннюю обкладку двойного слоя равняется нулю.

В капилляре большого диаметра толщина двойного электрического слоя **б** во много раз меньше радиуса капилляра $r(\delta_r/<<1)$, т. е. двойной слой занимает только часть объема капилляра. Остальной объем занимает свободный раствор. Поэтому участие ионов двойного слоя в диффузии практически не меняет значений чисел переноса N_k и N_a , характерных для контакта двух свободных растворов (рис. 3.2, а). В капилляре малого диаметра при $\delta_r/\leq1$, двойной слой занимает весь объем порового пространства. Числа переноса катионов и анионов существенно изменяются, благодаря участию в диффузии практически только катионов диффузного слоя и в пределе $N_k=1$, $N_a=0$ (рис. 3.2, б). Следовательно, для растворов $NaC\ell$ при T=18°C с уменьшением радиуса капилляров величины N_k и N_a изменяются соответственно от 0,4 до единицы и от 0,6 до нуля. В результате для капилляров большого диаметра по направлению диффузии раствор с меньшей концентрацией заряжается отрицательно, а для капилляра малого диаметра при этом же направлении диффузии раствор с меньшей концентрацией будет заряжаться положительно.



Рис.3.2. Схема переноса ионов в капиллярах большого (а) и малого (б) диаметра (условные обозначения см. рис.3.1)

Изменение чисел переноса наблюдается лишь в капиллярах радиусом r < 0,1 *мкм*, причем заметное изменение N_k и N_a происходит в капиллярах радиусом r < 0,015-0,02 *мкм*. Существенно (на 40% и более) изменяются числа переноса в капиллярах при r < 0,002-0,003 *мкм*.

Капилляры большого диаметра характерны для песков и песчаников. В песчаниках размер пор 10–70 *мкм*, поровых каналов 10–30 *мкм*. В алевролитах радиус пор изменяется от 10 до 0,1 *мкм*. Капилляры малого диаметра характерны для глинистых разностей, тонкодисперсные глины обладают ультратонкими капиллярами радиусом менее 0,1 *мкм*.

Для растворов одновалентного электролита $E_{\mathcal{A}A} = 58(N_k - N_a)lg\frac{C_1}{C_2}$.

Если перегородка, разделяющая растворы, содержит только крупные поры, величина E_{A} практически не отличается от E_{A} . При разделении растворов перегородкой с малыми порами значения N_{k} и N_{a} отличны от значений для свободного раствора и наблюдаемая ЭДС отличается от величины диффузионной ЭДС и в пределе, если поры представлены ультратонкими капиллярами, $N_k=1$, $N_a=0$ и $E_{\mathcal{A}A} = 58 \lg \frac{C_1}{C_2}$.

В качестве параметра, количественно характеризующего *диффузионно*адсорбционную активность породы принимается ее способность вызывать отклонение наблюдаемой ЭДС концентрационного происхождения E_{AA} от диффузионной ЭДС для той же пары растворов при их непосредственном контакте:

$$A_{\mathcal{A}\mathcal{A}} = \left(E_{\mathcal{A}\mathcal{A}} - E_{\mathcal{A}} \right) / lg \frac{C_1}{C_2}.$$
(3.7)

В лабораторных условиях величину диффузионно-адсорбционной активности $A_{\mathcal{I}\mathcal{A}}$ можно определить по керну как разность коэффициентов диффузионно-адсорбционной ЭДС $K_{\mathcal{I}\mathcal{A}}$ и диффузионной ЭДС $K_{\mathcal{I}\mathcal{A}}$ для данной пары растворов $A_{\mathcal{I}\mathcal{A}} = K_{\mathcal{I}\mathcal{A}} - K_{\mathcal{I}}$. (3.8) Величина $A_{\mathcal{I}\mathcal{A}}$ изменяется от 0 приблизительно до 70 мВ. В чистой негли-

нистой породе $A_{AA} \rightarrow 0$, в высокодисперсной глине $A_{AA} \rightarrow 70$ мВ. Диффузионно-адсорбционный потенциал тем больше отличается от по-

тенциала непосредственного контакта растворов, чем больше обличается от породе *тонкодисперсного глинистого материала* с размерами частиц менее 1 *мкм*, способствующего образованию ультратонких капилляров и являющегося *основной причиной различия между* $E_{дA}$ и E_{dA} .

Диффузионно-адсорбционные потенциалы в пластах, пересеченных скважиной

Естественное электрическое поле возникает благодаря изменению диффузионно-адсорбционных потенциалов на границах пластов, пересеченных скважиной.

Рассмотрим модель, включающую пласт чистого песчаника большой толщины и вмещающие тонкодисперсные глины, пересеченные скважиной (рис. 3.3). Минерализация пластовой воды (C_1) больше минерализации промывочной жидкости (C_2) .



1 – глина, 2 – песчаник, 3 – линии тока, 4 – статическая амплитуда ПС, 5 – фактическая диаграмма ПС



Для распределения зарядов в интервале песчаника подходит модель капилляра большого диаметра ($\delta/r <<1$), согласно которой по направлению диффузии в скважине будет знак минус, в пласте плюс. Величина диффузионного потенциала в интервале песчаника, пересеченного скважиной составит $E_{\mathcal{A}} = K_{\mathcal{A}} lg \frac{C_1}{C_2}$. В интервале глин, в соответствии с моделью капилляра малого диаметра ($\delta/r \approx 1$), по направлению диффузии скважина будет заряжена положительно, а пласт отрицательно, при этом величина диффузионно-адсорбционного потенциала составит $E_{\mathcal{A}\mathcal{A}} = K_{\mathcal{A}\mathcal{A}} lg \frac{C_1}{C_2}$.

На границе песчаника с вмещающими глинами, содержащими большое количество связанной воды такой же минерализации, как пластовая вода в песчанике, возникают электродвижущие силы вследствие различия контактирующих пород по их диффузионно-адсорбционной активности. Если считать, что на границе пластов расположены изолирующие экраны, то потенциал собственной поляризации будет меняться скачкообразно от положительного потенциала в глинах до отрицательного в песчанике, образуя *статическую ампли-туду* E_S (рис. 3.3).

$$E_{s} = E_{\mathcal{A}A} - E_{\mathcal{A}} = K_{\mathcal{A}A} lg \frac{C_{1}}{C_{2}} - K_{\mathcal{A}} lg \frac{C_{1}}{C_{2}} = K_{\Pi C} lg \frac{C_{1}}{C_{2}}, \qquad (3.9)$$

где $K_{\Pi C} = (K_{\Lambda A} - K_{\Lambda}) - коэффициент статической аномалии ПС. Знак минус перед величиной диффузионного потенциала связан с тем, что в контуре токов этот потенциал включен в обратном направлении по отношению к диффузионно-адсорбционному потенциалу.$

В условиях естественного залегания пород между пластами с различной диффузионно-адсорбционной активностью отсутствуют изолирующие экраны, поэтому потенциалы, возникающие на границе пластов, являются источником тока, плотность которого максимальна на пересечении скважиной границ пластов. Это является причиной отличия статической амплитуды E_s от замеряемой величины ΔU_{IIC} , которая меняется более плавно. Плотность тока с удалением от границ пластов уменьшается и в пластах большой толщины ΔU_{IIC} достигает E_s (рис. 3.3).



Принцип измерения потенциала самопроизвольной поляризации U_{IIC} в скважине предельно прост и сводится к замеру разности потенциалов между электродом M, который перемещается по стволу скважины, и неподвижным электродом N, опущенным в ёмкость с промывочной жидкостью на дневной поверхности (рис. 3.4). Электроды M и N изготавливают из свинца для исключения влияния на измеряемую величину нестабильной электродной разности потенциалов. Потенциал электрода N постоянный, поэтому диаграмма ПС отражает изменение потенциала электрического поля электрода M по глубине скважины. Разность потенциалов ПС измеряется в милливольтах.



Кроме диффузионно-адсорбционных потенциалов в скважине могут возникать фильтрационные и окислительно-востановительные потенциалы.

При фильтрации жидкости через капилляры пород возникают потенциалы течения, или *фильтрационные потенциалы* E_{ϕ} . Это обусловлено наличием на границах двойного слоя и свободного раствора электрокинетического потенциала ζ . Одновременно со свободным раствором, заполняющим среднюю часть капилляра, в направлении течения жидкости перемещается и подвижная часть внешней диффузной обкладки двойного электрического слоя. Это приводит к смещению электрокинетического потенциала ζ в направлении течения и возникновению на концах капилляра разности потенциалов течения и электрического тока. Если толщина двойного слоя мала по сравнению с радиусом капилляра, то потенциал фильтрации определяется выражением

$$E_{\phi} = \frac{\varepsilon_{\omega} \zeta \rho_{\phi}}{4\pi\mu} \Delta p , \qquad (3.10)$$

где ε_{m} – диэлектрическая постоянная жидкости, ρ_{ϕ} – удельное сопротивление фильтрата промывочной жидкости, μ – вязкость фильтрата, Δp – избыточное давление при продавливании жидкости, фактически разность между пластовым и забойным давлением в скважине. Потенциал фильтрации линейно зависит от перепада давления Δp и ρ_{ϕ} . С увеличением минерализации раствора E_{ϕ} уменьшается вследствие уменьшения величин ρ_{ϕ} и ζ . Параметры ε_{m} , ρ_{ϕ} и μ являются положительными при всех условиях и не изменяют знака потенциала фильтрации E_{ϕ} . Знак потенциала E_{ϕ} зависит от знака ζ -потенциала и направления избыточного давления. Потенциал фильтрации горных пород имеет отрицательный знак со стороны избыточного давления, т. е. со стороны скважины. На практике при исследовании нефтегазовых скважин потенциалы фильтрации не удается обнаружить, их роль существенна в области гидрогеологических исследований.

Окислительно-восстановительные потенциалы возникают в скважинах в результате различных окислительно-восстановительных процессов, протекающих на контакте пород с электронной проводимостью и электролитами. В скважине при наличии рудных тел, в результате их окисления, происходит потеря электронов, рудное тело приобретает положительный заряд и соответственно на кривой ПС будет выделяться среди вмещающих пород положительной аномалией $\Delta U_{\Pi C}$. Окислительно-восстановительные потенциалы образуются на контакте металлического электрода М с промывочной жидкостью, которые принято называть электродным потенциалом. Величина электродного потенциала во много раз больше диффузионно-адсорбционного потенциала. Исходя из требований к проведению геофизических исследований, минерализация промывочной жидкости по стволу скважины должна быть постоянной, соответственно электродный потенциал тоже будет постоянным. Поэтому перед началом регистрации диаграммы ПС электродный потенциал компенсируют компенсатором поляризации, и регистрируемая величина ΔU_{IIC} будет отражать изменение только диффузионно-адсорбционных потенциалов.

Одной из причин, искажающих диаграммы ПС, может быть наличие блуждающих и теллурических токов. *Теллурические токи* имеют естественное происхождение, они являются частью электромагнитного поля Земли. *Блуждающие токи* – промышленного происхождения, могут распространяться на десятки километров. Для полей блуждающих и теллурических токов характерно значительное изменение их во времени. Наличие блуждающих и теллурических токов можно установить по изменению во времени показаний регистрирующего прибора при остановке измерительного электрода *M*.

Геологическая интерпретация результатов измерения в скважине потенциалов собственной поляризации

Форма диаграммы ПС определяется измененидиффузионно-адсорбционной активности пород ем по стволу скважины, т. е. фактически глинистостью пород. Чистые известняки характеризуются наименьшей диффузионно-адсорбционной способностью и выделяются максимальной отрицательной аномалией ПС (рис. 3.5). В интервале глинистых известняков амплитуда отрицательной аномалии уменьшается. Тонкодисперсным глинам соответствует максимальная положительная аномалия ПС, в интервале аргиллитов, которые от глин отличаются наличием крупнозернистой фракции, аномалия ПС несколько меньше. Чистые песчаники характеризуются наименьшей диффузионно-адсорбционной способностью и на диаграмме ПС выделяются максимальной отрицательной аномалией. Можно считать, что водоносные и нефтеносные песчаники будут выделяться одинаковой аномалией ПС, пропорциональной соотношению минерализации пластовой воды или связанной воды в нефтеносном коллекторе и фильтрата промывочной жидкости. Присутствие глинистой фракции в песчаниках уменьшает амплитуду отрицательной аномалии (рис. 3.5). Границы пластов для электрически однородной среды выделяются по середине аномалий $\Delta U_{\Pi C}$.





1 — известняк, 2 — песчаник, 3 глинистый песчаник, 4 — аргиллит, 5 — глина

Замеряемая амплитуда ПС: $\Delta U_{\Pi C} = K_{\Pi C} lg \frac{C_1}{C_2}$. В интервале объекта раз-

работки минерализацию пластовой воды (C_1) можно считать постоянной. При проведении геофизических исследований минерализация промывочной жидкости (C_2) также должна быть постоянной. Следовательно, в данной скважине изменение $\Delta U_{\Pi C}$ будет определяться только величиной $K_{\Pi C}$, т.е. изменением глинистости пород в разрезе скважины. Однако от скважины к скважине минерализация промывочной жидкости может существенно меняться. Поэтому при интерпретации диаграмм ПС используют относительный параметр

$$\alpha_{\Pi C} = \frac{\Delta U_{\Pi C}}{\Delta U_{\Pi C}^{max}}.$$
(3.11)

Амплитуда $\Delta U_{\Pi C}^{max}$ отсчитывается от линии глин до максимального отклонения амплитуды ПС в интервале чистых песчаников, т.е. определяется по значениям в двух опорных пластах глины и песчаника. В качестве опорных выбираются пласты большой толщины, и замеряемая величина $\Delta U_{\Pi C}^{max}$ будет равна статической амплитуде E_S . Значение $\Delta U_{\Pi C}$ в интервале выделенных пластов соответствует амплитуде ПС, отсчитанной от линии глин. Относительная амплитуда $\alpha_{\Pi C}$, в отличие от замеряемой, не будет зависеть от минерализации промывочной жидкости, т.е. она определяется только глинистостью пород.

Метод ПС – один из наиболее информативных методов для литологического расчленения терригенного разреза и часто является одним из основных для выделения коллекторов. При количественной интерпретации метода ПС определяют глинистость коллекторов. А если существует связь между глинистостью коллектора и его пористостью, то данные метода ПС можно использовать для определения пористости.

Благоприятной предпосылкой для определения коэффициента пористости по диаграммам потенциалов собственной поляризации является наличие достаточно тесной корреляционной связи между относительной амплитудой ПС и коэффициентом пористости $\alpha_{\Pi C} = f(k_{\Pi})$, которую получают, сопоставляя значения $\alpha_{\Pi C}$ и средние значения k_{Π} для интервалов, в которых величина коэффициента пористости известна по данным представительного керна или другого геофизического метода. Наиболее тесная связь характерна для мономинеральных кварцевых коллекторов, в которых пелитовая фракция представлена глинистыми минералами и присутствует в виде заполнителя пустотного пространства и цемента. На месторождениях Западной Сибири коллекторы полиминеральные (полимиктовые). В таких породах содержание кварца в скелете 30 – 60%, а остальное приходится на полевые шпаты, которые характеризуются высоким содержанием глинистых минералов, которые присутствуют как в скелете породы, так и в пелитовой фракции. Поэтому связь между глинистостью и пористостью менее тесная, чем для кварцевых коллекторов.

В общем случае на зависимости $\alpha_{\Pi C} = f(k_{\Pi})$ для кварцевых коллекторов можно выделить четыре различных области (рис. 3.6). Минимальными значениями $\alpha_{\Pi C}$ выделяются тонкодисперсные глины (первая область). Вторая область соответствует аргиллитам, в которых кроме пелитовой фракции в незначительном количестве присутствуют алевритовая и песчаные фракции. В третьей области пелитовая фракция присутствует в виде заполнителя пустотного пространства и цемента. Эта группа характеризуется наиболее тесной связью между глинистостью и пористостью, и соответственно между $\alpha_{\Pi C}$ и k_{Π} .

По результатам лабораторных исследований и испытаний скважин

определяют нижнее критическое значение пористости, соответствующее коллектору и по зависимости $\alpha_{\Pi C} = f(k_{\Pi})$ определяют критическое значение апс. Это значение используют для выделения коллекторов в интервале отрицательных аномалий ПС. Четвертая область соответствует чистым не глинистым коллекторам, пористость которых зависит от степени однородности фракционного состава и укладки зерен. Поэтому в этой области связь между $\alpha_{\Pi C}$ и k_{Π} отсутствует. Граница между третьей и четвертой областями зависит от степени метаморфизма пород, с уменьшением возраста пород эта граница смещается в область более высоких значений k_{II} .



Рис. 3.6. Корреляционная связь между параметрами *α*_{ΠC} и **k**_Π для кварцевых коллекторов

3.2. Каротаж сопротивления обычными зондами

Для измерения электрического сопротивления применяются четырехэлектродные установки, включающие токовые электроды (A, B) и измерительные (M, N). Один электрод заземлен на поверхности, а три составляют зонд КС, который перемещается по стволу скважины. Зонды КС включают два сближенных и один удаленный электроды. По относительному расположению электродов и замеряемым параметрам электрического поля зондовые установки делят-



ся на потенциал-зонды и градиент-зонды (рис. 3.7). Применяются зонды КС: однополюсные (в скважине расположен один токовый электрод A и два измерительных – M и N) и двухполюсные (в скважине два токовых электрода – A и B и один измерительный – M).

Рис. 3.7. Схемы измерения кажущегося сопротивления горных пород в скважине обычными зондами КС:

а – однополюсный подошвенный градиент-зонд, б – двухполюсный потенциал-зонд. Г – генератор тока для создания электрического поля в скважине; R – реостат; РП – регистрирующий прибор

Для *потенциал-зондов* сближенные электроды разноименные. На практике обычно применяются двухполюсные зонды. Длина зонда (*L*) равна расстоянию между сближенными электродами. Точкой записи является измерительный электрод *M*. В наименовании зонда электроды записываются сверху вниз, числа соответствуют расстоянию между электродами в метрах. Например, В7,5А0,5М – двухполюсный потенциал-зонд, длина которого 0,5 м.

В градиент-зондах сближенные электроды одноименные. Обычно применяются однополюсные зонды. Длина зонда равна расстоянию от удаленного электрода до середины между сближенными электродами, которая соответствует точки записи. Измерения проводят подошвенными (последовательными) градиент-зондами, у которых одноименные измерительные электроды расположены ниже удаленного токового, и кровельными (обращенными) – одноименные измерительные электроды расположены выше удаленного токового электрода. Например, A2M0,5N подошвенный и N0,5M2A кровельный градиент-зонды, длиной 2,25 м.

Электрическое поле в однородной среде

Методы кажущегося сопротивления основаны на изучении распределения искусственно созданного электрического поля в горных породах. Обычно кажущееся удельное сопротивление среды, окружающей зонд, определяется по наблюденным значениям потенциала U или разности потенциалов ΔU электрического поля, созданного источником тока силой I.

Чтобы установить связь удельного электрического сопротивления среды с замеряемыми параметрами электрического поля ($U, \Delta U$), силой тока и геометрическими размерами зонда, необходимо определить значение потенциала в однородной изотропной среде от точечного источника тока.

Разность потенциалов в однородной среде удельного сопротивления *р* между двумя близкими эквипотенциальными сфериче-

скими поверхностями, в центре которых расположен точечный источник тока A (рис. 3.8), определяется выражением

$$dU = -\frac{I\rho}{4\pi r^2} dr. \qquad (3.12)$$

Знак минус показывает, что с увеличением расстояния r от источника тока потенциал уменьшается. Интегрируя по r от $r = \infty$ до r = AM, получим

$$U_{M} = \frac{\rho I}{4\pi} \int_{\infty}^{AM} \frac{dr}{r^{2}} = \frac{I\rho}{4\pi AM},$$



Рис.3.8. Схема определения потенциала точечного источника тока

где АМ – расстояние между токовым и измерительным электродами.

Удельное сопротивление в скважине обычно замеряется на переменном токе небольшой частоты (сотни Гц), чтобы исключить влияние на результаты измерений промышленных токов и электродной поляризации.

Для градиент-зонда $U_M = \frac{I\rho}{4\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) = \frac{I\rho}{4\pi AM}$, поскольку *BM>>AM*. Аналогично $U_N = \frac{I\rho}{4\rho AN}$. Следовательно, разность потенциалов между электродами *M* и *N*

$$\Delta U = U_M - U_N = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AM + MN} \right) = \frac{I \rho}{4\pi} \frac{MN}{AM(AM + MN)}$$

Это уравнение позволяет вычислить УЭС однородной среды. При исследовании разрезов скважин среда неоднородная и мы по этому уравнению получаем не истинные, а кажущееся сопротивление

$$\rho_{K} = 4\pi \frac{AM(AM + MN)}{MN} \frac{\Delta U}{I} = K_{\Delta U} \frac{\Delta U}{I}, \qquad (3.14)$$

где $K_{\Delta U} = 4\pi \frac{AM (AM + MN)}{MN}$ коэффициент градиент-зонда.

Для потенциал-зонда потенциал заземленного электрода N и потенциал поля от электрода B в точке M равны нулю, так как расстояние MB и AN значительно больше AM. Для однородной среды $U_{AM} = \frac{I\rho}{4\pi AM}$. Для неоднородной

среды
$$\rho_K = 4\pi AM \frac{U_M}{I} = K_U \frac{U}{I},$$
 (3.15)

где $K_U = 4\pi AM -$ коэффициент потенциал-зонда.

Таким образом, измеряя потенциал U, разность потенциалов ΔU при постоянном токе I и заданных расстояниях измерительных электродов от источника тока определяем кажущееся сопротивление $\rho \kappa$.

Существуют разные формулировки понятия *радиус исследования* (глубинность) методов. Для обычных зондов КС за радиус исследования условно можно принять радиус сферы в однородной среде, заключающий объем породы, который оказывает такое же влияние на показания зонда, как и остальная часть среды, расположенная за пределами этой сферы (50%, возможно и другая величина). Для градиент-зонда радиус исследования равен *длине зонда*, для потенциал-зонда – *двум длинам зонда*. Пласт, пересеченный скважиной, представляет неоднородную среду, и радиус исследования будет зависеть от размеров и электрического сопротивления цилиндрически неоднородных сред. Приведенные значения можно рассматривать как максимально возможные значения радиуса исследования.

Форма кривых кажущегося сопротивления для обычных зондов КС без учета влияния скважины

Кривые КС для градиент-зондов

Пласт высокого сопротивления большой толщины среди вмещающих пород низкого сопротивления ($h_{n\lambda} > L$, $\rho_1 = \rho_3$, $\rho_2 > \rho_1$)

Подошвенный градиент-зонд

Кажущееся сопротивление $\rho \kappa$ измеренное градиент-зондом отличается от истинного его значения во столько раз, во сколько плотность тока в неоднородной среде j' отличается от плотности тока в однородной среде j:

$$\rho_{K} = \frac{j^{\prime}}{j} \rho_{MN} \,. \tag{3.16}$$

При удалении зонда от нижней границы пласта высокого сопротивления на расстояние более 2*L* параметры поля соответствуют однородной изотропной среде удельного сопротивления ρ_1 . В этом случае $j' = j_1$ и $\rho_{K1} = \rho_1$.

С приближением токового электрода A к подошве пласта высокого сопротивления плотность тока j' у измерительных электродов M и N плавно возрастает $j_1 < j' \le 2j_1$ за счет экранирования линий тока, что ведет к аналогичному увеличению кажущегося сопротивления $\rho_1 < \rho_{K1} \le 2\rho_1$ (рис. 3.9, изменение ρ_K в интервале *ab*). Когда электрод A достигает подошвы пласта, экранное влияние пласта высокого сопротивления максимальное.



$$\rho_{K1} = \frac{j'}{j_1} \rho_1 = \frac{2\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}. \qquad (3.17)$$

В пределе при $\rho_2 \rightarrow \infty$, ρ_{κ_1} достигает $2\rho_1$, что объясняется полным экранированием линий тока.

С удалением токового электрода от нижней границы пласта 2, измерительные электроды приближаются к ней, вследствие происходит взаимная компенсация, и плотность тока остается постоянной, пока измерительные электроды не достигнут границы. Соответственно на этом участке, размеры которого равны длине зонда, *рк1* остается постоянным (рис. 3.9, *bc*).

Рис. 3.9. Форма кривой КС для подошвенного градиент-зонда против пласта высокого сопротивления большой толщины:

1 – пласт высокого сопротивления ρ_2 ; 2 – пласты низкого сопротивления $\rho_1 = \rho_3$; 3 – кривая КС; 4 – график изменения УЭС

Когда электроды *M* и *N* на границе между пластами, в пласте 1 $\rho_{K1} = \frac{j'}{j_1} \rho_1$,

а в пласте 2 $\rho_{K_2} = \frac{j'}{j_2} \rho_2$. В виду непрерывности линий тока в двух близко распо-

ложенных точках должно выполняться равенство $j_1=j_2$, и следовательно, $\rho_{K_2}/\rho_{K_1} = \rho_2/\rho_1$. Поэтому на границе между пластами ρ_{K_2} превышает ρ_2 и достигает максимального значения (рис. 3.9, точка *d*):

$$\boldsymbol{\rho}_{K \max} = \boldsymbol{\rho}_{K1} \frac{\boldsymbol{\rho}_2}{\boldsymbol{\rho}_1} = \frac{2\boldsymbol{\rho}_2^2}{\boldsymbol{\rho}_1 + \boldsymbol{\rho}_2} = \frac{2}{\boldsymbol{\rho}_1/\boldsymbol{\rho}_2 + 1} \, \boldsymbol{\rho}_2 > \boldsymbol{\rho}_2 \,. \tag{3.18}$$

Так как $\rho_{\kappa_1} > \rho_1$ и с возрастанием ρ_2 стремится к $2\rho_1$, то и $\rho_{\kappa_2} > \rho_2$, и с ростом ρ_2 стремится к $2\rho_2$.

При удалении зонда от границы раздела, влияние нижележащего пласта на плотность тока уменьшается и $j' \rightarrow j_2$, $\rho \kappa \rightarrow \rho_2$ (рис. 3.9, *de*). Кажущееся сопротивление достигает ρ_2 на расстоянии 1,5*L* от подошвы пласта (рис. 3.9, *ef*).

С приближением зонда к кровле пласта высокого сопротивления на расстоянии равном (1,5–2)*L* начинается утечка тока в вышележащий низкоомный пласт, у измерительных электродов плотность тока падает, ρ_{k2} плавно уменьшается (рис. 3.9, *fg*). Когда токовый электрод достигает верхней границы пласта $\rho_{k2} = \frac{2\rho_2 \rho_3}{\rho_2 + \rho_3}$. До пересечения границы пласта измерительными электродами на

участке, равном размеру зонда, *рк*остается постоянным (рис. 3.9, *gh*).

Когда измерительные электроды расположены на верхней границе пласта высокого сопротивления (рис. 3.9, *l*) плотность тока *j*[/] резко уменьшается, кажущееся сопротивление минимальное, и при $\rho_2 \rightarrow \infty$, стремится к нулю. В силу непрерывности линий тока в точках, прилегающих к границе пластов, $\rho_{K3}/\rho_{K2} = \rho_3/\rho_2$,

$$\rho_{K\min} = \rho_{K2} \frac{\rho_3}{\rho_2} = \frac{2}{\rho_2/\rho_3 + 1} \rho_3 < \rho_3.$$
 (3.19)

По мере удаления зонда вверх от пласта высокого сопротивления плотность тока увеличивается и стремится к плотности тока в пласте 3 $j' \rightarrow j_3$, $\rho \kappa_3 \rightarrow \rho_3$ (рис. 3.9, *lm*). На расстоянии 1,5*L* от кровли пласта высокого сопротивления $j'=j_3$, $\rho \kappa_3 = \rho_3$.

На кривых КС последовательного градиент-зонда границам пласта высокого сопротивления соответствуют экстремальные значения кажущегося сопротивления максимум – подошве пласта, минимум – кровле. Более четко выделяется подошва пласта, поэтому наряду с термином последовательный градиентзонд широко применяется термин подошвенный градиент-зонд.

Кровельный градиент-зонд

Кривые КС кровельного градиент-зонда являются зеркальным отображением кривых КС подошвенного градиент-зонда в плоскости, проходящей через середину пласта и параллельной его границам.

При приближении зонда к нижней границе пласта высокого сопротивления в связи с экранированием плотность тока у измерительных электродов и кажущееся сопротивление, уменьшаются (рис. 3.10, участок кривой *ab*). Экранирующие влияние высокоомного пласта наибольшее, когда измерительные электроды достигают границы между пластами 1 и 2 (рис. 3.10, *b*), *рк1* минимальное и при $\rho_2 \rightarrow \infty$ стремится к нулю. В силу непрерывности линий тока в точках, прилегающих к границе пластов, $\rho_{K2}/\rho_{K1} = \rho_2/\rho_1$,

$$\boldsymbol{\rho}_{K\min} = \boldsymbol{\rho}_{K2} \frac{\boldsymbol{\rho}_1}{\boldsymbol{\rho}_2} = \frac{2}{\boldsymbol{\rho}_2/\boldsymbol{\rho}_1+1} \, \boldsymbol{\rho}_1 < \boldsymbol{\rho}_1.$$

При пересечении измерительными электродами подошвы высокоомного пласта $\rho \kappa$ возрастает (рис. 3.10, *bc*) и достигает величины $\rho_{\kappa_2} = \frac{2\rho_1\rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$. До пересечения подошвы высокоомного пласта токовым электродом на участке, равном длине зонда, $\rho \kappa_2$ остается постоянным (рис. 3.10, *cd*). По мере перемещения зонда по пласту 2 вследствие уменьшения влияния нижележащего низкоомного пласта кажущееся сопротивление возрастает (рис. 3.10, *de*). Величина $\rho \kappa_2$ асимптотически достигает ρ_2 на расстоянии 2*L* от подошвы высокоомного пласта.

При приближении измерительных электродов на расстояние 1,5L от кровли высокоомного пласта плотность тока j' возрастает, за счет утечки тока в вышележащий низкоомный пласт, что ведет к аналогичному увеличению ρ_{K2} (рис. 3.10, fg), которое достигает максимального значения при пересечении кровли измерительными электродами. В силу непрерывности линий тока в точ-ках, прилегающих к границе пластов

$$\rho_{K max} = \rho_{K2} \frac{\rho_2}{\rho_3} = \frac{2}{\rho_3/\rho_2 + 1} \rho_2 > \rho_2.$$



После пересечения кровли высокоом-
ного пласта измерительными электродами
$$\rho \kappa$$

уменьшается до значения $\rho_{\kappa_3} = \frac{2\rho_2\rho_3}{\rho_2 + \rho_3}$ и ос-
тается постоянным, пока токовый электрод
не достигнет кровли пласта (рис. 3.10, *hl*). По
мере удаления от границы между пластами 2
и 3, $\rho \kappa$ плавно уменьшается и становится
равным ρ_3 на расстоянии 2*L*.

На кривых КС кровельного градиентзонда кровле и подошве пласта высокого сопротивления соответствуют максимальные и минимальные $\rho \kappa$.

Рис. 3.10. Форма кривой КС для кровельного градиент-зонда против пласта высокого сопротивления большой толщины (условные обозначения см. рис.3.9)

Таким образом, на кривых подошвенного градиент-зонда четко отмечается подошва пласта высокого сопротивления, кровельного градиент-зонда – его кровля. Поэтому для исследований в скважинах применяются оба зонда.

Пласт высокого сопротивления малой толщины среди вмещающих пород низкого сопротивления ($h_{n\lambda} << L$, $\rho_1 = \rho_3$, $\rho_2 >> \rho_1$)

Подошвенный градиент-зонд

На расстояние больше 2L от подошвы пласта высокого сопротивления ток распространяется, как и в однородной среде удельного сопротивления ρ_1 . В этом случае $j' = j_1$ и $\rho_{K_1} = \rho_1$. С приближением токового электрода к подошве пласта плотность тока *j* у измерительных электродов вследствие экранирования возрастает, что ведет к аналогичному увеличению *рк* (рис. 3.11, *ab*). Когда электрод А расположен на границе между пластами, экранирующее влияние наибольшее (рис. 3.11, точка *b*) $j_1 < j' \le 2j_2$, соответственно кажущееся сопротивление, называемое экранным максиму- Рис.3.11. Форма кривой КС для подошвенмом, достигает наибольшего значения

$$\boldsymbol{\rho}_{K\,\text{max}}^{3\text{KP}} = \frac{2\boldsymbol{\rho}_1\boldsymbol{\rho}_2}{\boldsymbol{\rho}_1 + \boldsymbol{\rho}_2}.$$
 (3.20)



ного градиент-зонда против пласта высокого сопротивления малой толщины) (условные обозначения см. рис.3.9)

Расстояние между экранным максимумом и подошвой пласта высокого сопротивления равно длине зонда.

При перемещении токового электрода по пласту 2 увеличивается утечка тока в верхний низкоомный пласт и плотность тока у измерительных электродов уменьшается. Когда токовый электрод достигает кровли высокоомного пласта (рис. 3.11, *c*), происходит полная утечка тока, $0 \le j' < j_1$, соответственно кажущееся сопротивление достигает минимального значения $0 \le \rho_{K\min}^{3\kappa p} < \rho_1$. При перемещении токового электрода по пласту 3, измерительные электроды остаются в пласте 1, т.е. между токовым и измерительными электродами расположен пласт высокого сопротивления – высокоомный экран. Минимальное значение кажущегося сопротивления остается постоянным, пока измерительные электроды не достигнут подошвы высокоомного пласта (рис. 3.11, cd). Этот участок кривой называется зоной экранного минимума. Величина кажущегося сопротивления в интервале экранного минимума зависит от ρ_2 и не отражает свойств пласта, в котором находятся измерительные электроды. Если сопротивление высокоомного экрана бесконечно велико, то $\rho_{K\min}^{3\kappa p} \rightarrow 0$.

При пересечении измерительными электродами подошвы высокоомного пласта кажущееся сопротивление возрастает и достигает максимума (рис. 3.11, de). По аналогии с рассматриваемой формой кривой рк для пласта большой толщины на этой границе кажущееся сопротивление составит $\rho_{K2} = \rho_{K1} \frac{\rho_2}{\rho_1}$.

Поскольку в интервале экранного минимума $\rho \kappa_1 < \rho_1$, то максимальное значение $\rho \kappa_2$ будет меньше ρ_2 . По мере приближения измерительных электродов к кровле пласта плотность тока j' и соответственно $\rho \kappa_2$ несколько снижается (рис. 3.11, *ef*), в связи с утечкой тока в верхний низкоомный пласт.

По аналогии с пластом большой толщины, при пересечении верхней границы высокоомного пласта измерительными электродами плотность тока j^{j} резко уменьшается, ρ_{k2} минимальное (рис. 3.11, fg) и при $\rho_{2} \rightarrow \infty$ стремится к нулю,

$$\rho_{K\min} = \rho_{K2} \frac{\rho_3}{\rho_2} < \rho_3.$$

При перемещении зонда вверх по низкоомному пласту плотность тока возрастает и на расстоянии 1,5L $j' = j_3$, $\rho \kappa_3 = \rho_3$.

Кривая КС кровельного градиент-зонда представляет собой зеркальное отображение кривой $\rho \kappa$ подошвенного зонда и соответственно экранный минимум будет выделяться выше высокоомного пласта.

По форме кривой кажущегося сопротивления в интервале высокоомного пласта малой толщины можно определить тип и размеры градиент-зонда.

Кривые КС для потенциал-зонда

Пласт высокого сопротивления большой толщины среди вмещающих пород низкого сопротивления (h_n> L, ρ₁=ρ₃, ρ₂>ρ₁)

Форма кривых кажущегося сопротивления, полученных потенциалзондом существенно отличаются от кривых градиент-зонда. Кажущееся сопротивление, измеренное потенциал-зондом, отличается от истинного его значения во столько раз, во сколько плотность тока в неоднородной среде j' отличается от плотности тока в среде однородной j:

$$\boldsymbol{\rho}_{K} = \left(\frac{j'}{j} \boldsymbol{\rho}_{M\infty}\right) c \boldsymbol{p} \,. \tag{3.21}$$

При положении потенциал-зонда на значительном удалении от высокоомного пласта (более 5*L*) $j'=j_1$ и $\rho_{K1}=\rho_1$. По мере приближения токового электрода к подошве пласта за счет экранирования линий тока, плотность тока и кажущееся сопротивление возрастают (рис. 3.12, *ab*). При положении токового электрода на нижней границе высокоомного пласта $\rho_{K1} = \frac{2\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$. При переме-

щении токового электрода по пласту, в результате взаимной компенсации кажущееся сопротивление остается постоянным пока измерительный электрод не пересечет подошву пласта высокого сопротивления (рис. 3.12, *bc*). После перехода электрода M в пласт 2 кажущееся сопротивление возрастает, асимптотически приближаясь к ρ_2 (рис. 3.12, *cd*). Зона перехода от $\rho \kappa_1$ к $\rho \kappa_2 \approx \rho_2$, тем больше, чем выше отношение ρ_2/ρ_1 и больше размер зонда. Протяженность этой зоны практически не превышает пятикратного размера зонда. С приближением токового электрода к кровле пласта высокого сопротивления за счет утечки тока в верхний низкоомный пласт плотность тока и кажущееся сопротивление уменьшаются (рис. 3.12, *ef*).

При положении токового электрода на верхней границе пласта $\rho_{K2} = \frac{2\rho_2 \rho_3}{\rho_2 + \rho_3}$, и зна-

чение $\rho \kappa$ остается постоянным, пока измерительный электрод не пересечет верхнюю границу пласта (рис. 3.12, *fg*). При перемещении зонда вверх по низкоомному пласту плотность тока и кажущееся сопротивление возрастают (рис. 3.12, *gh*), на значительном удалении от высокоомного пласта $j'=j_3$, $\rho \kappa_3 = \rho_3$.

На практике точку записи смещают от электрода M на середину расстояния между токовым и измерительным электродами. В этом случае кривая кажущегося сопротивления потенциал-зонда становится симметричной и границы пласта выделяются по середине участка постоянных значений $\rho \kappa$, равного длине зонда.



Рис. 3.12. Форма кривой КС для потенциал-зонда против пласта высокого сопротивления большой толщины:

1 – пласт высокого сопротивления р₂;

2 – пласты низкого сопротивления р₁=р₃;

3 – кривая КС; 4 – график изменения УЭС;

5 – кривая КС при смещении точки записи

Пласт высокого сопротивления малой толщины среди вмещающих пород низкого сопротивления ($h_{n\lambda} << L$, $\rho_1 = \rho_3$, $\rho_2 >> \rho_1$)

С приближением зонда к пласту высокого сопротивления происходит экранирование линий тока, кажущееся сопротивление возрастает и достигает наибольшей величины $\rho_{K1} = \frac{2\rho_1\rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$, когда токовый электрод расположен на нижней границе пласта (рис. 3.13, точка *b*). В этой точке значение ρ_{K1} зависит от ρ_2 , и в пределе при $\rho_2 \rightarrow \infty$ достигает $2\rho_1$. При перемещении токового электрода по высокоомному пласту кажущееся сопротивление уменьшается (рис. 3.13, *bc*) и становится минимальным $0 < \rho_{K1} < \rho_1$, когда токовый электрод расположен на верхней границе высокоомного пласта (рис. 3.13, точка с). Кажущееся сопротивление остается постоянным пока измерительный электрод не достигнет нижней границы высокоомного пласта (рис. 3.13, *cd*). Этот участок кривой, размер которого равен разности между длиной зонда и толщиной пласта $(L - h_{n_n})$ называется *экранным мини-мумом*. При дальнейшем перемещении измерительного электрода по высоко-омному пласту кажущееся сопротивление возрастает (рис. 3.13, *de*) и достигает наибольшего значения $\rho_{K2} = \frac{2\rho_2\rho_3}{\rho_2 + \rho_3}$, когда измерительный электрод расположен на кровле пласта. По мере удаления зонда от границы высокоомного пласта ρ_{K3} снижается и асимптотически достигает ρ_3 (рис. 3.13, *ef*).

При смещении точки записи, как и в случае пласта большой толщины, кривая КС становится симметричной относительно середины пласта.



Рис. 3.13. Форма кривой КС для потенциал-зонда против пласта высокого сопротивления малой толщины (условные обозначения см. рис. 3.12)

Пласт высокого сопротивления малой толщины, в отличие от пласта большой толщины, отмечается на кривой КС потенциал-зонда минимумом кажущегося сопротивления. Это не является существенным недостатком потенциал-зонда, поскольку на практике длина зонда не превышает 1*м*, и, следовательно, высокоомные пласты толщиной больше длины зонда будут выделяться высокими сопротивлениями на диаграммах потенциал-зонда.

Сравнительная характеристика градиент- и потенциал-зондов

Градиент-зондом замеряется разность потенциалов между сближенными электродами. Связь кажущегося сопротивления, зарегистрированного градиентзондом, с истинным удельным сопротивлением среды выражается как $\rho_{\kappa} = \frac{j'}{j} \rho_{MN}$. Значение кажущегося сопротивления определяется только удельным электрическим сопротивлением среды, расположенной между сближенными электродами, расстояние между которыми составляет от 0,2 до 1*м*. Этим объясняется достаточно сложная форма кривой кажущегося сопротивления градиент-зонда.

Потенциал-зонд замеряет величину потенциала измерительного электрода M от токового электрода A. Связь кажущегося сопротивления с истинным удельным сопротивлением среды имеет вид $\rho_{K} = \left(\frac{j'}{j}\rho_{M\infty}\right)cp$. В этом выражении

рк определяется как среднее значение в интервале от точки *M* до бесконечно-

сти. Фактически определяющее влияние оказывают участки неоднородной среды, расположенные от токового электрода A на расстоянии, не превышающем 5–10 размеров зонда (размер зонда 0,5 - 1 M).

Следовательно, размеры среды, которая определяет значение кажущегося сопротивления при измерениях потенциал-зондом, в несколько раз больше, чем при измерениях градиент-зондом. Этим объясняется различная форма кривых КС, зарегистрированных градиент- и потенциал-зондом, в последнем случае значение $\rho \kappa$ меняется более плавно и кривая КС симметрична относительно середины пласта.

К достоинству градиент-зонда можно отнести четкое выделение границ пластов по экстремальным значениям *рк*, а кривая КС потенциал-зонда по форме близка к изменению удельного электрического сопротивления пластов.

Влияние скважины и зоны проникновения фильтрата промывочной жидкости на измерения обычными зондами КС

Диаграммы КС, зарегистрированные в скважине, отличаются от рассмотренных расчетных кривых, полученных без учета влияния скважины. Это объясняется влиянием диаметра скважины dc и удельного сопротивления промывочной жидкости ρ_c , размеров *D*3*п* и удельного сопротивления ρ_{3n} зоны проникновения фильтрата промывочной жидкости. Поэтому кривые КС, зарегистрированные в скважине, более сглаженные, но позволяют выделить основные элементы изменения формы кривых, рассчитанных без учета влияния скважины.

Рассмотрим диаграммы КС, зарегистрированные в интервале нефтеносного и водоносного песчаников, залегающих среди низкоомных глинистых разностей (рис.3.14).

Размеры малого градиент-зонда A1M0,1N меньше диаметра зоны проникновения, и значения кажущегося сопротивления в интервале коллекторов будут определяться сопротивлением зоны проникновения фильтрата промывочной жидкости, поэтому нефтеносные и водоносные коллекторы выделяются как высокоомные пласты среди низкоомных вмещающих глинистых разностей. Длина зонда во много раз меньше толщины пласта и границы пластов четко выделяются экстремальными значениями на диаграммах, зарегистрированных малым градиент-зондом.

С увеличением размера зонда до A2M0,5N радиус исследования превышает размеры зоны проникновения и в интервале нефтеносного пласта на величину кажущегося сопротивления начинает влиять удельное электрическое сопротивление пласта. Поэтому замеренное значение сопротивления больше, чем по малому зонду. Соответственно в интервале водоносного пласта значение кажущегося сопротивления меньше, чем по малому зонду из-за влияния на величину $\rho \kappa$ удельного электрического сопротивления низкоомного водоносного коллектора.



Рис. 3.14. Диаграммы КС, зарегистрированные градиент- и потенциал-зондами:

1 – песчаник нефтеносный, 2 – песчаник водоносный, 3 – зона проникновения фильтрата промывочной жидкости, 4 – глина, 5 – существенные значения КС; удельное электрическое сопротивление: нефтеносного пласта 50 Ом⋅м, водоносного – 4 Ом⋅м, глин – 5 Ом⋅м,

зоны проникновения – 20 Ом м. Толщина песчаников 6 м, диаметр зоны проникновения 0,8 м.

На диаграмме КС, зарегистрированной зондом A4M0,5N в интервале нефтеносного пласта продолжается рост кажущегося сопротивления, поскольку радиус исследования значительно превышает диаметр зоны проникновения. В интервале водоносного пласта значения $\rho \kappa$ приближаются к удельному электрическому сопротивлению коллектора, в этом случае замеренное значение КС мало отличается от сопротивления вмещающих пород и границы водоносного пласта выделить трудно.

Таким образом, из анализа диаграмм КС, зарегистрированных градиентзондами различной длины, следует, что малые зонды по увеличению сопротивления относительно вмещающих пород в результате образования зоны проникновения позволяют уверенно выделять границы залегания коллекторов. Кажущееся сопротивление, замеренное зондами больших размеров, отражает изменение по разрезу удельного электрического сопротивления и позволяет дифференцировать коллекторы по газонефтеводонасыщенности.

На диаграммах потенциал-зонда водоносные и нефтеносные пласты выделяются симметричными кривыми КС. Границы пластов определяются по точкам перехода от медленного к быстрому росту $\rho \kappa$, поэтому границы пластов предпочтительнее определять по экстремальным значениям $\rho \kappa$ на диаграммах градиент-зондов. Глубинность потенциал-зонда несколько меньше глубинности двухметрового градиент-зонда, в рассматриваемом случае на величину кажущегося сопротивления больше влияют параметры зоны проникновения и в интервале водоносного пласта значения *ρк* по потенциал-зонду превышают величину *ρк* на диаграмме градиент-зонда (рис. 3.14, *B7,5A0,75M*).

Для интерпретации диаграмм КС вводится понятие *существенного значения* кажущегося сопротивления, величина которого пропорциональна удельному электрическому сопротивлению пласта, пересеченного скважиной или сопротивлению зоны проникновения при больших ее размерах.

При измерениях градиент-зондами наиболее значительное влияние оказывают вмещающие породы со стороны токового электрода на расстоянии (1– 1,5) длины зонда. Для зондов малой длины это влияние незначительно, поэтому на практике в качестве существенных принимаются средние значения $\rho \kappa$ (рис. 3.14, A1M0,1N). Для больших градиент-зондов на расстоянии (1–1,5)L от вмещающих пород выделяется интервал с практически постоянными значениями кажущегося сопротивления, принимаются в качестве существенных (рис. 3.14, A2M0,5N). Когда длина зонда приближается или превышает толщину пласта $L \ge$ 0,7 h_{nA} , на диаграмме градиент-зонда нельзя выделить интервал, которому соответствуют достаточно постоянные значения $\rho \kappa$ (рис. 3.14, A4M0,5N), поэтому в качестве существенного значения принимается экстремальное значение – максимальное (минимальное) значение $\rho \kappa$ в подошве или кровле пласта, соответственно для подошвенного или кровельного градиент-зондов.

Для потенциал-зонда существенными значениями в зависимости от толщины пласта являются максимальные или средние значения кажущегося сопротивления (рис. 3.14, *B7*,5*A*0,75*M*).

3.3. Боковое каротажное зондирование

Основной задачей при интерпретации диаграмм КС является определение удельного электрического сопротивления пластов. Пласт, пересеченный скважиной, представляет собой цилиндрически неоднородную двухслойную среду, а при наличии зоны проникновения – трехслойную среду, поэтому по замеру зондом одного размера нельзя определить сопротивление пласта.

При измерении одним зондом КС в двухслойной среде $\rho \kappa \neq \rho n$ из-за влияния скважины, но кажущееся сопротивление по стволу скважины будет меняться пропорционально удельному электрическому сопротивлению пород. При наличии зоны проникновения фильтрата промывочной жидкости в пласт пропорциональность между $\rho \kappa$ и ρn нарушается.

Для определения удельного электрического сопротивления пластов применяется метод бокового каротажного зондирования (БКЗ), предусматривающий измерение кажущегося сопротивления пластов по разрезу скважин набором однотипных зондов разной длины, на каждый из которых будут по-разному влиять элементы неоднородной трехслойной среды (скважина, зона проникновения, пласт). На практике применяют обычно комплекс подошвенных градиент-зондов. Наименьшая длина зонда составляет от 2 до 4 диаметров скважины, длина каждого последующего зонда увеличивается в 2 раза. Размер наибольшего зонда не превышает 8 м. Обычно комплекс БКЗ включает четыре-пять подошвенных градиент-зондов (A0,4M0,1N; A1M0,1N; A2M0,5N; A4M0,5N; A8M1N) и один кровельный зонд M0,5N2A (M0,5N4A).

Удельное электрическое сопротивление пластов определяют по сопоставлению замеренных значений кажущегося сопротивления с теоретическими кривыми БКЗ, которые рассчитаны для пластов неограниченной толщины, однородных по направлению оси скважины. Для расчетов использовалась модель, в которой зонд располагался по оси скважины, зона проникновения фильтрата промывочной жидкости имеет цилиндрическую форму, сопротивление в пределах зоны проникновения постоянное. В реальных условиях зонд расположен практически на стенке скважины, по форме зона проникновения отличается от цилиндра, и ее сопротивление изменяется в радиальном направлении от стенки скважины. Опыт показывает, что, несмотря на отличие расчетной модели от реального пласта, пересеченного скважиной, метод БКЗ позволяет достаточно точно определять удельное электрическое сопротивление пластов.

Одна палетка БКЗ рассчитана для двухслойной среды (рис.3.15), а остальные – для трехслойной.

На палетках БКЗ по оси ординат отложены отношения кажущегося сопротив-

Рис.3.15. Двухслойная палетка БКЗ

ления к сопротивлению промывочной жидкости $\rho \kappa / \rho c$, по оси абсцисс отношение длины зонда к диаметру скважины L/dc. Палетки включают серии *теоретических кривых* БКЗ для различных соотношений удельного электрического сопротивления пласта к сопротивлению промывочной жидкости $\rho n / \rho c$ (модуль кривой БКЗ). Кривые БКЗ построены в логарифмическом масштабе.

Для конкретной скважины ρc и *dc* постоянные и кривую БКЗ можно рассматривать как зависимость кажущегося сопротивления ρk от длины зонда *L*. С уменьшением длины зонда все кривые БКЗ стремятся к асимптоте $\rho \kappa$ = ρc . С увеличением длины зонда при $\rho \kappa > \rho c$ кажущееся сопротивление возрастает и максимальное значение превышает сопротивление пласта, различие между ними возрастает с ростом ρn . При дальнейшем увеличении длины зонда теоретические кривые стремятся к асимптоте $\rho \kappa = \rho n$. Длина зонда, при которой теоретические кривые БКЗ выходят на асимптоту, увеличивается с ростом ρn . Для случая $\rho n < \rho c$ с ростом длины зонда кажущееся сопротивление уменьшается и становится несколько меньше ρn , и при дальнейшем увеличении длины асимптотически стремится к ρn . Точки максимумов и минимумов кривых БКЗ соединены линией В, линия А соответствует точкам пересечения кривых БКЗ с асимптотами $\rho \kappa = \rho n$. Точка пересечения координатных осей $\rho \kappa = \rho c$ и L = dc называется *крестом палетки*.

Обработка и интерпретация данных БКЗ

Для определения сопротивления по БКЗ выбирают достаточно однородные пласты, в интервале которых значения кажущегося сопротивления различаются не более чем на 30%.

Выделение пластов и определение их толщины проводят по диаграммам, зарегистрированным градиент-зондами наименьшей длины. По диаграммам комплекса БКЗ в выделенном интервале определяют существенные значения кажущегося сопротивления, по которым на прозрачном билогарифмическом бланке строят фактическую кривую БКЗ. В логарифмических масштабах по оси абсцисс откладывают длины зондов в метрах, а по оси ординат соответствующие им значения $\rho \kappa$ в $O_{M} \cdot M$. На этот же бланк наносится точка с координатами по оси абсцисс – dc и по оси ординат – ρc . Пересечение линий dc и ρc называется крестом фактической кривой БКЗ (крест скважины). По полученным точкам строится фактическая кривая БКЗ, представляющая собой зависимость вида $\rho \kappa = f(L)$.

Фактическую кривую БКЗ, построенную на логарифмическом бланке в системе координат lg рк и lgL, совмещают с одной из кривых палетки в системе координат $lg(\rho\kappa/\rho c) = lg\rho\kappa - lg\rho c$ и lg(L/dc) = lgL - lgdc. Системы координат фактической кривой и палетки различаются на величину отрезков lgpc и lgdc. Следовательно, для совмещения фактической кривой с палеткой достаточно совместить крест скважины с крестом палетки. При этом точки фактической кривой БКЗ совмещаются с одной из теоретических кривых или располагаются согласованно между двумя кривыми палетки. Удельное электрическое сопротивление пласта находят по модулю палеточной кривой $\rho n / \rho c$ или по пересечению фактической кривой с линией А палетки. В последнем случае для отсчета рп в пользуются шкалой сопротивлений интерпретационного бланка Ом·м (рис.3.16).



Рис.3.16. Интерпретация фактической кривой БКЗ по двухслойной палетке БКЗ:

1 – фактическая кривая БКЗ, 2 – палеточные кривые, 3 – линия А



Рис.3.17. Типы фактических кривых БКЗ, при наличии проникновения в пласт

При определении сопротивления промывочной жидкости ρc по резистивиметру возможны ошибки связанные с особенностями его конструкции. Кроме того, при положении зонда на стенке скважины с уменьшением длины зонда ρk стремится не к ρc , а к среднему удельному сопротивлению промывочной жидкости и пород, окружающих скважину $\left(\frac{2\rho_c \rho_n}{\rho_c + \rho_n}\right)$. Поэтому при интерпретации

БКЗ с целью уточнения *рс* допускается перемещение креста скважины по оси ординат, если за счет этого достигается лучшее совмещение фактической кривой БКЗ с теоретической. Таким образом, принцип определения удельного электрического сопротивления по БКЗ сводится к совмещению фактической кривой с теоретической кривой палетки.

Если фактическая кривая БКЗ не совмещается ни с одной из двухслойных кривых БКЗ, то следует предположить, что кривая является трехслойной и ее форма обусловлена наличием проникновения фильтрата промывочной жидкости в пласт. Различают три вида проникновения фильтрата промывочной жидкости в пласт: повышающее удельное сопротивление пласта ($\rho_{31} > \rho_{11}$); понижающее удельное сопротивление пласта ($\rho_{31} < \rho_{11}$); нейтральное проникновение ($\rho_{31} \sim \rho_{11}$). Кривая, соответствующая повышающему проникновению, отмечается крутым спадом после максимума (рис.3.17). Для понижающего проникновения характерно возрастание ρ_{K} по мере увеличения длины зонда (рис.3.17). В этом случае для определения сопротивления пласта необходимо пользоваться трехслойными палетками БКЗ.

3.4. Микрокаротаж

Микрокаротаж проводится обычными зондами КС малой длины (микрозондами). Микрокаротаж применяется для определения электрического сопротивления части пласта, непосредственно прилегающей к скважине, и детального расчленения разреза.

Электроды микрозонда, изготовленные из латунного стержня диаметром 10 мм, размещены на внешней стороне башмака из изоляционного материала. Расстояние между электродами 2,5 см. Для исключения влияния скважины на результаты измерений башмак внешней стороной прижимается к стенке скважины управляемым рычажным устройством.

В микрозонде с управляемым рычажным прижимным устройством башмак с электродами шарнирно укрепляется на одной из двух пар рычагов, которые прижимаются спиральной пружиной к стенке скважины любого диаметра с постоянным усилением (рис.3.18). Прижимное устройство опускается в скважину в закрытом состоянии, а в интервале записи открывается по команде с поверхности. Одновременно с кривыми микрозондов это устройство позволяет регистрировать кривую изменения диаметра скважины с глубиной – микрокавернограмму.



Рис.3.18. Схема конструкции микрозонда с прижимным устройством:

1 — штанга, 2 — рычаг, 3 — электроды, 4 — башмак

На практике обычно применяют потенциал-микрозонд *А0,05М* и градиент-микрозонд *А0,025М0,025N*. Радиус исследования градиент-микрозонда приблизительно равен его длине (3,75 *см*), а потенциал-микрозонда в 2 – 2,5 раза больше его длины, т. е. составляет 10 – 12 *см*.

Кривые КС микрозондов

Между электродами зонда и породой находится промежуточный слой – глинистая корка или пленка промывочной жидкости. За счет влияния этого слоя величина $\rho \kappa$ будет отличаться в общем случае от истинного удельного электрического сопротивления породы. Поэтому наибольшая информация о разрезе может быть получена при одновременной интерпретации кривых КС градиент- и потенциал-микрозонда.

Поскольку радиус исследования градиент-микрозонда меньше, чем потенциал-микрозонда, то на его показания оказывают большее влияние промывочная жидкость и глинистая корка, а на показания потенциал-микрозонда – промытая зона. Если минерализация пластовой воды выше, чем промывочной жидкости, то против проницаемого пласта $\rho \kappa_{2M3}$ меньше $\rho \kappa_{nM3}$. В этом случае имеет место так называемое положительное приращение микрозондов $\Delta \rho \kappa$ =($\rho \kappa_{nM3}$ - $\rho \kappa_{2M3}$)>0. Показания $\rho \kappa_{2M3}$ против водоносных и нефтегазоносных пла-



стов не различаются, а значения *рк*_{*пмз*} против продуктивных пластов выше, чем против водоносных пластов, за счет остаточного нефтенасыщения.

Рис. 3.19. Пример диаграмм микрозондов КС: МПЗ и МГЗ – потенциал- и градиент- микрозонд, ДС – диаметр скважины (кавернограмма)

На рис. 3.19 в интервале глубин 2504,4 – 2512,8 м по методу ПС четко выделяется пласт песчаника, на диаграмме, показывающей изменение диаметра скважины, видно, что $d_c = 0,188 \text{ M}$, т.е. пласт является проницаемым и произошло образование глинистой корки, в связи с этим на диаграммах микрометодов наблюдается положительное приращение $\rho_{K_{2M3}}=4 \text{ } O_{M\cdot M}, \rho_{K_{RM3}}=7 \text{ } O_{M\cdot M}.$

Непроницаемые плотные породы выделяются изрезанными кривыми КС, а значение кажущегося сопротивления превышает сопротивление промывочной жидкости в 25–30 раз. Против непроницаемых пластов высокого сопротивления также наблюдается расхождение кривых сопротивления вследствие влияния глинистой пленки, заключенной между башмаком микрозонда и стенкой скважины. Иногда в непроницаемых пластах высокого сопротивления показания градиент-микрозонда превышают показания потенциал-микрозонда, так как плотность тока в тонком слое жидкости между изоляционным башмаком и породой, т. е. в интервале расположения измерительных электродов градиент-микрозонда, сильно возрастает.

Против глинистых пластов величины кажущихся сопротивлений, измеренные градиент- и потенциал-микрозондами, обычно совпадают и соответствуют удельному сопротивлению глин, кривые КС носят пилообразный характер. При наличии против глинистого пласта каверн значительных размеров измеренные кажущиеся сопротивления соответствуют чаще всего сопротивлению промывочной жидкости. В результате катионного обмена удельное сопротивление глин в непосредственной близости от скважины (в пределах слоя толщиной 2,5–5 *см*) может несколько измениться, что отмечается на кривых, полученных обычными микрозондами, как положительное расхождение и иногда ошибочно трактуется как признак проникновения глинистого раствора.

В отдельных случаях, когда сопротивление промывочной жидкости больше сопротивления пласта, сопротивление, измеренное градиентмикрозондом, превышает сопротивление, полученное потенциалмикрозондом.

Кривые КС микрозондов можно рассматривать как симметричные относительно середины пластов.

Данные микрозондирования позволяют выделять пласты коллектора и проводить их детальное расчленение, т.е. выделять залегающие среди них тонкие слабопроницаемые прослои плотных высокоомных пород. Малые размеры микрозондов позволяют определять границы отдельных пластов и прослоев разного сопротивления с точностью до 5–10 см по резким изменениям аномалий кривых КС. Это дает возможность оценивать степень однородности пласта и определять его эффективную толщину. По результатам измерений $\rho \kappa$ микрозондами оценивают удельное сопротивление промытой зоны пласта и по специальным палеткам оценивают толщину глинистой корки.

3.5. Боковой каротаж

Боковой каротаж (БК) является разновидностью электрического каротажа по методу сопротивления с фокусировкой тока.

При измерении эффективного сопротивления этим методом в скважину опускается зонд, состоящий из основного токового *A* и двух или нескольких экранных электродов *Э*, однополярных с основным и расположенных по обе стороны от него на равных расстояниях.

Термины «эффективное сопротивление» и «кажущееся сопротивление» близки по смыслу. Главное их различие состоит в том, что эффективное сопротивление всегда прямо пропорционально удельному сопротивлению сред, а кажущееся сопротивление, измеренное обычными зондами, может находиться не в прямой зависимости от сопротивления среды.

Сравним характер распределения токовых линий от электрода A в случае обычных зондов КС (рис. 3.20, а) и при наличии экранирующих электродов в зондах БК (рис. 3.20, б) в пласте высокого сопротивления ($\rho n > \rho_{em} > \rho_c$). В пер-

вом случае значительная часть токовых линий проходит через скважину во вмещающие пласты низкого сопротивления. Во втором случае экранные электроды препятствуют растеканию тока от электрода *A* по стволу скважины и направляют его в глубь исследуемых пород, что уменьшает влияние скважины и вмещающих пород.



Боковой каротаж имеет три модификации, в которых используются трех-, семи- и девятиэлектродные зонды.

Трехэлектродный боковой каротаж

Трехэлектродный зонд метода БК представляет собой длинный проводящий цилиндрический электрод, разделенный изоляционными промежутками на три части (рис. 3.21, а). Центральный короткий электрод A_0 зонда является токовым, а крайние A_1 и A_2 , соосные и равные по диаметру первому, но более длинные, – экранные. Экранные электроды соединены между собой и через них пропускается ток той же полярности, что и через электрод A_0 . Вторым токовым электродом, на который замыкается цепь источника тока, служит электрод **В**, расположенный на поверхности или в скважине.

Характерными размерами трехэлектродного фокусированного зонда являются: общий размер зонда L_{oo} – расстояние между внешними концами электродов A_1 и A_2 ; длина зонда L_3 – расстояние между серединами интервалов, изолирующих центральный электрод от экранных электродов; диаметр зонда d_3 (рис. 3.21, а). За точку записи кривой эффективного сопротивления условно принимается середина центрального электрода A_0 .

Обшая длина фокусированного зонда выбирается равной примерно 3,2 м; минимальная тол- тродного зонда БК (б) щина пласта, которая выделяется этим



трехэлектродного Рис.3.21. Схема трехэлектродного зонда БК (а); характер распределения токовых линий в однородной среде для трехэлек-

зондом, 0,5 м при длине центрального электрода 0,15 м. Диаметр зонда, исходя из условия проходимости прибора по стволу скважины, принят равным 73 мм.

Центральный токовый электрод A₀ является одновременно измерительным М. Регистрируется изменение потенциала электрода М относительно удаленного электрода N, находящегося на изолированном участке кабеля не ближе чем на 20 м от центрального электрода.

Для записи кривой эффективного сопротивления необходимо обеспечить равенство потенциалов питающего и экранирующих электродов. Это достигается двумя способами: 1) сила тока через экранные электроды автоматически поддерживается такой, чтобы разность потенциалов между питающим и экранирующим электродами была равна нулю (рис.3.22, а); 2) все три электрода соединяются гальванически через небольшое сопротивление порядка 0,01 Ом (рис.3.22, б), в этом случае при соответствующем подборе размеров центрального и экранных электродов значения их потенциалов будут равны.

Когда достигается равенство потенциалов всех трех электродов, ток из

центрального электрода A не растекается по скважине, а распространяется в слое среды, перпендикулярном к оси скважины (рис. 3.21, б), толщина этого слоя приблизительно равна длине центрального электрода A_0 .

Радиус исследования зонда равен радиальному расстоянию от скважины до точки, в которой толщина слоя выходящих из основного электрода токовых



линий начинает значительно увеличиваться, т.е. расстояние на котором линии тока параллельны. Приближенно можно считать, что глубина исследования равна длине экранного электрода. При длине экранного электрода 1,5 *м* предельный радиус исследования зонда равен 1,5 *м*.

Рис.3.22. Схемы измерения эффективного сопротивления трехэлектродным зондом БК с автокомпенсатором (а) и с шунтирующим сопротивлением R₀ (б):

I₀, I₃ – токи, питающие соответственно центральный электрод A₀ и экранные электроды A₁ и A₂; РУ – регулирующее устройство силы тока, протекающего через экранные электроды

Влияние скважины, зоны проникновения и вмещающих пород на показания бокового каротажа

Эффективное сопротивление, измеренное зондом бокового каротажа, зависит от типа и характеристики зонда, удельных сопротивлений пласта ρn , вмещающих пород ρBM , зоны проникновения $\rho 3n$, промывочной жидкости ρc , а также от геометрических факторов этих сред.

Можно считать, что в цепь питающего электрода A_0 последовательно включены три области – промывочная жидкость, зона проникновения, неизменная порода. С учетом полного объема пространства, окружающего зонд, измеряемое эффективное сопротивление против однородного мощного пласта выражается

$$\rho_{\mathbf{3}\phi} = G_C \rho_C + G_{3\Pi} \rho_{3\Pi} + G_{\Pi} \rho_{\Pi}, \qquad (3.22)$$

где *Gc*, *Gзп*, *Gn* – псевдогеометрические факторы соответствующих частей пространства, которые зависят от длины проводника и его сечения. Сумма всех геометрических факторов составляет полный объем изучаемого пространства и равна единице.

На показания БК большое влияние оказывает повышающее проникновение. При D/dc > 4 значение $\rho_{s\phi}$ завышается в несколько раз, а при D/dc > 8 – почти полностью определяется сопротивлением зоны проникновения. Это влияние возрастает с увеличением отношения ρ_{sn} / ρ_n и уменьшением толщины пласта. Понижающее проникновение относительно мало влияет на величину $\rho_{3\phi}$ и становится заметным лишь при больших (*D/dc*>6) глубинах проникновения. Это явление легко объяснить, если учесть характер распространения силовых линий тока при БК. В случае повышающего проникновения ток, прежде чем достигнуть неизмененной части пласта, должен преодолеть большое сопротивление в зоне проникновения, что вызывает значительное, часто преобладающее, падение потенциала на этом участке пласта. Если значение ρ_{3n} мало по сравнению с ρ_n (понижающее проникновение), падение потенциала невелико, влияние зоны проникновения существенно уменьшается.

Влияние вмещающих пород на показания БК зависит от толщины пласта и соотношения сопротивлений пласта и вмещающих пород. В пласте с малым удельным сопротивлением, окруженного породами высокого сопротивления, токовый слой сужается и течет внутри тонкого пласта малого сопротивления. Это приводит к увеличению замеряемого эффективного сопротивления против пород малого удельного электрического сопротивления по сравнению с пластом большой толщины. В пласте высокого сопротивления, окруженного породами малого сопротивления, ток стремится распространяться за пределы тонкого пласта высокого сопротивления и замеряемое сопротивление снижается по сравнению с пластами большой толщины.

Для зондов БК при толщине пласта h>4dc значения $\rho_{s\phi}$ против пластов ограниченной толщины мало отличаются от $\rho_{s\phi}$ для пластов неограниченной толщины. Следовательно, зонды БК имеют лучшую вертикальную характеристику по сравнению с другими зондами электрического каротажа.

Кривые эффективного сопротивления

Кривые эффективного сопротивления, записанные всеми фокусированными зондами метода БК против одиночных пластов высокого и низкого сопротивления при равенстве сопротивлений вмещающих пород, симметричны относительно середины пласта. По форме они напоминают кривые КС, полученные потенциал-зондом. В случае значительной толщины пластов (h>16dc) на кривой $\rho_{3\phi}$ против середины пласта наблюдается зона пониженного эффективного сопротивления. Снижение $\rho_{3\phi}$ не превышает 10–15% от максимального ее значения. Границы пластов высокого сопротивления на кривых эффективного сопротивления, полученных трехэлектродным БК (рис.3.23), определяют по началу максимального возрастания $\rho_{3\phi}$.





В качестве существенных значений эффективного сопротивления против одиночных однородных пластов принимаются экстремальные значения $\rho_{s\phi}$ – максимальные в случае высокого сопротивления пласта, минимальные при низком сопротивлении. Против неоднородного пласта отсчитывается среднее значение.

Кривые трехэлектродного БК обладают высокой расчленяющей способностью, по ним достаточно уверенно выделяются пласты толщиной 0,5 – 1,0 м.

Использование БК особенно эффективно для расчленения пачек пластов высокого сопротивления малых толщин. В отличие от диаграмм КС потенциалзонда и градиент-зонда на диаграммах БК четко выделяются все пропластки высокого сопротивления, если их толщины и толщины разделяющих прослоев близки к длине центрального электрода или превышают ее. Экранные влияния отдельных пропластков вызывают незначительное увеличение эффективных сопротивлений в средней части пачки.

Области применения метода БК

Метод БК наиболее эффективен в скважинах, заполненных соленой промывочной жидкостью ($\rho c < 0, 1-0, 5 \ Om \cdot m$). При проникновении в пласт жидкости высокой минерализации сопротивление прискважинной части пласта понижается, что практически не влияет на показания $\rho_{3\phi}$, зарегистрированные зондами БК. В случае проникновения фильтрата промывочной жидкости, повышающего сопротивление пласта, использование $\rho_{3\phi}$ для определения истинного удельного электрического сопротивления пласта становится малоэффективным.

Высокая расчленяющая способность, благоприятная форма кривых эффективного сопротивления и отсутствие экранирования со стороны соседних пластов высокого сопротивления являются преимуществом БК по сравнению со всеми другими методами электрического каротажа. В связи с этим метод БК эффективен при изучении тонкослоистых разрезов и неоднородных пластов, а также высокоомных разрезов.

3.6. Боковой микрокаротаж

При боковом микрокаротаже (БМК) применяют микрозонды с автоматической фокусировкой тока, благодаря чему влияние промежуточного слоя на показания микрозонда уменьшается. Практическое применение получили три разновидности БМК – двух-, трех- и четырехэлектродный.

Двухэлектродный боковой микрокаротажный зонд (рис.3.24, а) состоит из основного A_o и окружающего его экранного A_j электродов. Электроды A_o и A_j занимают всю внешнюю поверхность башмака, кроме изоляционного промежутка шириной 5 *мм*, который отделяет их друг от друга. При измерении через электроды пропускаются токи одинаковой полярности и потенциал обоих электродов сохраняется постоянным. Это достигается автоматическим регулированием силы тока через экранные электроды, так же как в трехэлектродном БК.



Рис.3.24. Зонды двухэлектродного (а) и трехэлектродного (б) БМК: 1 – башмак зонда, 2 – глинистая корка, 3 – промытая зона

Благодаря фокусировке тока основного электрода, показания БМК значительно меньше искажены влиянием промежуточного слоя, чем показания микрозондов КС, и поэтому зависят главным образом от удельного сопротив-

ления части пласта, примыкающей к скважине. Это хорошо видно при сравнении характера распределения токовых линий в обычных микрозондах и БМК (рис.3.25). Большая часть тока, выходящего из токового электрода A микрозонда, течет вдоль глинистой корки, вследствие чего на измеряемые разности потенциалов между электродами M и N заметно влияет глинистая корка. Влияние глинистой корки тем больше, чем больше ее толщина и чем выше отношение удельного сопротивления породы к удельному сопротивлению глинистой корки.

При БМК экранный ток из электрода *А*_э препятствует току, отдаваемому цен-



Рис.3.25. Схема распределения линий тока для зонда микробокового каротажа (а) и микрозонда КС (б)

тральным электродом A_0 , растекаться в стороны и направляет его в породу горизонтальным пучком (рис.3.25, а). Этот пучок практически перпендикулярен стенке скважины. Поскольку токовые линии пересекают глинистую корку преимущественно в горизонтальном направлении, расстояние, проходимое током по глинистой корке, мало по сравнению с расстоянием, которое он проходит в породе. Кроме того, сопротивление глинистой корки обычно много меньше удельного сопротивления породы. В связи с этим падение электрического потенциала в глинистой корке составляет лишь малую долю полного падения потенциала и ее влияние на результаты измерений незначительно, если толщина глинистой корки не слишком велика.

Трехэлектродный БМК имеет основной токовый электрод A_o, расположенный в середине башмака, и охватывающий его экранный электрод А., В отличие от двухэлектродного зонда в промежутке между ними располагается измерительный электрод М в виде тонкой рамки (рис. 3.24, б). При постоянном токе через основной электрод сила тока через экранный электрод регулируется таким образом, чтобы разность потенциалов между электродами A_o и Mбыла равна нулю, при этом потенциал экранного электрода А_э больше потенциала основного электрода А₀. Поэтому в непосредственной близости от зонда токовый пучок электрода А_о сжимается, а затем, на некотором расстоянии от зонда, расширяется. Такая фокусировка тока основного электрода трехэлектродного зонда БМК обеспечивает ему заметное увеличение радиуса исследования по сравнению с двухэлектродным. Полагают, что глинистая корка толщиной до 20 мм не оказывает влияние на показания такого зонда. Так как толщина глинистой корки редко превышает 20 мм, можно считать, что практически всегда величина ρ_{3c} , замеренная трехэлектродным зондом БМК, зависит главным образом от сопротивления промытой зоны. Поэтому измерения трехэлектродным зондом БМК называют каротажем ближней зоны.

Данные БМК могут быть использованы для точной отбивки границ пластов, выделения плотных прослоев и определения эффективной толщины продуктивных коллекторов. Основным достоинством БМК является возможность в ряде случаев определять сопротивление промытой зоны $\rho n 3$. При толщине глинистой корки не более 10 *мм* значение $\rho_{3\phi}$, полученное по данным БМК, мало отличается от $\rho n 3$. Если поправки за влияние промежуточного слоя, вводимые в показания зонда МБК, небольшие, величина $\rho n 3$ по данным БМК определяется достаточно точно, в дальнейшем она может быть использована для оценки пористости или остаточной нефтегазонасыщенности пластов.

Наиболее широкое применение БМК находит при исследовании разрезов скважин, заполненных минерализованной промывочной жидкостью. В этих условиях комплекс методов электрического каротажа ограничен и кривую БМК обычно сопоставляют с кривой БК. Показания БМК против нефтегазонасыщенных пластов в этом случае меньше показаний БК, что связано с наличием зоны понижающего проникновения.

3.7. Индукционный каротаж

Индукционным каротажем (ИК) называют изучение удельного сопротивления (удельной электропроводности) пересеченных скважиной горных пород, основанное на измерении вторичного поля вихревых токов, индуцированных в породе.

В основе метода лежит закон электромагнитной индукции (закон Фарадея), устанавливающий взаимосвязь между магнитными и электрическими явлениями. ЭДС электромагнитной индукции в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром: $E = -\frac{d\Phi}{dt}$, знак "минус" в этой формуле соответствует правилу Ленца: магнитное поле возникающего индукционного (вихревого) тока всегда противодействует тому изменению магнитного потока через контур, которое вызвало этот ток.

Индукционный зонд состоит из двух катушек – генераторной и приемной, размещенных на непроводящем и немагнитном стержне. Генераторная катушка подключена к генератору переменного тока частотой (20–100 $\kappa \Gamma \mu$) и питается стабилизированным по частоте и амплитуде током. Когда прибор находится в скважине, переменный ток, протекающий по генераторной катушке, создает переменное магнитное поле. Под действием этого поля в окружающих горных породах возникают вихревые токи, которые создают в пространстве вторичное переменное магнитное поле. Изменение во времени вторичного магнитного поля создает ЭДС в измерительной катушке, величина которой прямо пропорциональна электропроводности горных пород. Кроме того, в приемной катушке наводится сигнал от первичного поля не связанный с горными породами, поэтому ЭДС, индуцированная прямым полем, компенсируется встречной ЭДС, равной первой по величине и противоположной по фазе, с помощью дополнительных катушек.

Активный сигнал фиксируется на поверхности измерительным устройством в виде кривой, отражающей изменение электропроводности пород по разрезу скважины. Точкой записи кривой является середина расстояния между центрами генераторной и измерительной катушек. Единицей измерения электропроводности пород является сименс на метр (C_M/M) – величина, обратная ом-метру ($O_M \cdot M$). На практике используют тысячную долю сименса на метр – миллисименс на метр (MC_M/M).

Индукционный каротаж принципиально отличается от всех методов стационарного электрического поля прежде всего тем, что для создания вторичного электромагнитного поля в горных породах не требуется непосредственного (гальванического) контакта зондовой установки с окружающей средой. Если в методах КС и БК электрический ток распространяется в горные породы от токовых электродов через слой проводящей жидкости (промывочной), то в индукционных методах электроды как таковые не используются и вторичное электромагнитное поле формируется в горных породах за счет индуктивной связи первичного электромагнитного поля со средой, окружающей зонд. Следовательно, индукционный каротаж позволяет изучать разрезы скважин, пробуренных с обычной промывочной жидкостью и с промывочной жидкостью на нефтяной или другой основе, плохо проводящей электрический ток.

Индукционный каротаж отличается также характером распределения вторичных токов, индуцированных генераторной катушкой в горных породах: их токовые линии лежат в плоскостях, перпендикулярных к оси генераторной катушки. В однородной среде линии вихревых токов представляют собой окружности с центрами на оси прибора, т.е. токовые линии распространяются в одной среде – не пересекают границы между средами с различной электропроводностью.

Приближенная теория низкочастотных индукционных методов

Приближенная теория низкочастотного индукционного метода впервые была разработана Х. Г. Доллем в 1949 г.

Решение прямой задачи индукционных методов состоит в получении зависимости измеряемой ЭДС электромагнитного поля от электропроводности среды, ее геометрии и параметров зонда.

В теории предполагается, что частота переменного тока относительно невелика, проводимость сред мала, и поэтому можно пренебречь взаимным влиянием вихревых токов. При этом измеряемый сигнал может быть представлен суммой отдельных сигналов, создаваемых различными участками среды.

Влияние отдельных кольцевых областей среды на величину сигнала является функцией проводимости этих областей и их геометрического фактора, который зависит от положения кольцевого объема относительно генераторной и приемной катушек зонда. При расчетах принимается, что размеры катушек малы по сравнению с диаметром любой кольцевой области породы, влияние которой определяется, т.е. катушки можно заменить магнитными диполями. В измерительной цепи зонда измеряется только активная составляющая ЭДС.

В приближенной теории используется представление о *единичной петле* (элементарном кольце) и ее геометрическом факторе. Единичная петля есть участок породы, вырезанный из проводящего пространства двумя горизонтальными плоскостями и двумя коаксиальными с осью скважины цилиндрическими поверхностями, т.е. это горизонтальное кольцо с центром на оси скважины. Сечение кольца будет квадратом со сторонами, малыми по сравнению с его диаметром, и площадью, равной единице.

Определим ЭДС, которая наводится в измерительной катушке вихревым током в единичной петле.

Рассмотрим однородную изотропную среду удельной электропроводности σ . На оси скважины расположен двухкатушечный индукционный зонд. Центры генераторной и измерительной катушек расположены на общей оси на расстоянии L_3 одна от другой. Ось генераторной катушки совпадает с осью скважины (рис. 3.26). L_{Γ} и L_{Π} – расстояния от генераторной и приемной катушек до рассматриваемой точки среды. Генераторная и измерительная катушки имеют одинаковую площадь витков $S=\pi r^2 n$, r – радиус витков, n – их количество. Условимся считать, что размеры катушек значительно меньше расстояния L. Это допущение позволяет рассматривать катушки как точечные. Генераторную катушку можно заменить для упрощения расчетов магнитным диполем с переменным моментом.

Для решения задачи введем цилиндрическую систему координат ($rz\phi$), начало которой расположим в точке 0, являющейся серединой расстояния между



центрами генераторной и измерительной катушек. Разобьем все изучаемое пространство на элементарные кольца.

Генераторная катушка питается переменным током с амплитудой I_{θ} , мгновенное значение которого $I=I_{\theta}$ sin ωt , где t – время; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; f – циклическая частота.

Упомянутый выше магнитный диполь, ось которого совпадает с осью генераторной катушки, создает в окружающем пространстве первичное переменное магнитное поле, под его действием в единичном кольце возникает вихревой ток силой I_{K} . Этот ток создает в окружающем пространстве вторичное магнитное поле. Изменение этого поля во времени наводит в измерительной катушке ЭДС, которая выражается формулой

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{K}_{3} \boldsymbol{g}\boldsymbol{\sigma}, \qquad (3.23)$$

где K_3 – коэффициент зонда, определяющийся его конструкцией: длиной, числом и площадью витков генераторной и приемной катушек, силой и частотой тока, питающего генераторную катушку:

$$K_3 = \frac{S_{\Gamma} S_{\Pi} \omega^2 I}{4\pi L_3} \quad ; \tag{3.24}$$

g – пространственный (геометрический) фактор элементарного кольца.

$$g = \frac{L_3 r_K^3}{2 L_\Gamma^3 L_\Pi^3}.$$
 (3.25)

Выразим расстояния от центров генераторной и измерительной катушек до оси элементарного кольца через цилиндрические координаты *r* и *z*. Из рис. 3.26 следует:

$$L_{\Gamma} = \sqrt{r_k^2 + (L_3/2 + z)^2}; \quad L_{\Pi} = \sqrt{r_k^2 + (L_3/2 - z)^2} \quad (3.26)$$

Из выражений (3.25) и (3.26) следует, что значение пространственного фактора элементарного кольца определяется его вертикальным расположением

относительно катушек и горизонтальным расстоянием от оси зонда при фиксированной длине зонда.

В теории Долля введение понятия геометрического (пространственного) фактора элементарного кольца занимает одно из центральных мест. Рассмотрим его физический и геометрический смысл.

Выясним геометрический смысл пространственного фактора.

Для треугольника *ABC* (рис. 3.26) на основании теоремы синусов запишем $\frac{\sin \gamma}{L_3} = \frac{\sin \alpha}{L_{\Pi}}$, из прямоугольного треугольника *ADC* $\sin \alpha = \frac{r_K}{L_{\Gamma}}$, из этих вы-

ражений следует $\frac{\sin \gamma}{L_3} = \frac{r_K}{L_{\Gamma}L_{\Pi}}$. Сопоставив с выражением (3.25), получим

$$g = \frac{\sin^3 \gamma}{2L_3^2}.$$
 (3.27)

Из этого выражения следует, что пространственный фактор полностью определяется величиной угла γ между расстояниями от генераторной и приемной катушек до рассматриваемой точки среды L_{Π} и L_{Γ} , под которыми виден зонд из точек элементарного кольца. В этом состоит *геометрический смысл* пространственного фактора. Следовательно, все элементарные кольца, из точек которых виден зонд под одним и тем же углом, имеют одинаковые пространственные факторы.

Геометрическим местом сечений элементарных колец с равными пространственными факторами являются окружности, проходящие через центры генераторной и измерительной катушек. Значения пространственного фактора изменяются от 0 до 1. Максимальную величину он имеет в случаях, когда $sin\gamma=1$, т. е. угол $\gamma=90^{\circ}$. Сечения этих колец лежат на окружности с диаметром, равным длине зонда.

Физический смысл пространственного фактора элементарного кольца заключается в том, что он определяет ту долю сигнала на выходе измерительной катушки зонда, которую вносят различные участки изучаемой среды.

Представление пространственного фактора элементарным кольцом позволяет получить сигнал от различных участков среды. В случае однородной среды величины ЭДС, создаваемые ее участками, зависят только от их пространственных факторов.

Выражение (3.23) определяет величину сигнала, создаваемую в измерительной катушке одним элементарным кольцом породы. Электродвижущая сила всего исследуемого пространства будет равна сумме ЭДС элементарных колец породы:

$$E = K_3 \sigma \int_{0}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g \, dr \, dz \,. \tag{3.28}$$

Доказано, что для однородной изотропной среды суммарный пространственный фактор равен единице $\int_{0}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g \, dr \, dz = 1$.В этом случае отношение *E/K_K* рав-

но на основании (3.28) истинной удельной электропроводности среды $\sigma = \frac{E}{K_3}$.

Для неоднородной среды, имеющей участки с электропроводностями пласта *озп*, зоны проникновения *озп*, скважины *ос* и вмещающих пород *овм*, полная ЭДС будет равна сумме сигналов от каждого участка среды. Вклад каждого участка в суммарный сигнал равен произведению его электропроводности на пространственный фактор. Полная ЭДС в такой неоднородной среде:

$$E = K_3 (\sigma_C G_C + \sigma_{3\Pi} G_{3\Pi} + \sigma_\Pi G_\Pi + \sigma_{BM} G_{BM}), \qquad (3.29)$$

где *Gc*, *G3п*, *Gп*, *Gвм* – геометрические факторы соответствующих однородных участков среды, определяемые выражением $G = \int_{0}^{+\infty+\infty} \int_{0}^{+\infty+\infty} g \, dr \, dz$.

В случае неоднородной среды эффективная удельная электропроводность

$$\sigma_{\mathcal{P}\mathcal{P}} = E/K_3 = \sigma_C G_C + \sigma_{\mathcal{I}\Pi} G_{\mathcal{I}\Pi} + \sigma_{\Pi} G_{\Pi} + \sigma_{\mathcal{B}M} G_{\mathcal{B}M}; \qquad (3.30)$$
$$G_C + G_{\mathcal{I}\Pi} + G_{\Pi} + G_{\mathcal{B}M} = 1.$$

Измеряемая эффективная электропроводность в общем случае отличается от истинной удельной электропроводности пласта вследствие искажающего влияния на величину сигнала параметров скважины, зоны проникновения, вмещающих пород и соседних пластов. Это отличие тем существеннее, чем неоднороднее исследуемая среда.

Из выражения (3.30) следует, что удельная электропроводность участка среды и его пространственный фактор равнозначны при формировании полного сигнала, т.е. произведение σG определяет долю сигнала каждой среды. Участок среды с высокой электропроводностью, но малым пространственным фактором может создать такой же сигнал, как и участок среды с низкой электропроводностью, но большим пространственным фактором. Чем выше электропроводность отдельных участков среды, тем значительнее величина сигнала от них; при весьма низкой электропроводности какого-либо участка среды его вклада в полный сигнал практически не будет.

Таким образом, вклад однородного участка среды в общий сигнал определяется его электропроводностью и геометрическим фактором. При заданном распределении электропроводности для определения сигнала достаточно найти геометрические факторы соответствующих участков среды.

Зонды индукционного каротажа

Простейший зонд ИК может состоять из двух катушек: генераторной Γ и приемной (измерительной) Π (U). Расстояние между серединами генераторной и измерительной катушек есть длина L_3 индукционного зонда.

Многокатушечный зонд представляет собой систему катушек, укрепленных на одном изоляционном стержне (рис. 3.27). Генераторная и измерительная катушки являются основными, остальные называются фокусирующими в генераторной $\Phi\Gamma$ и измерительной $\Phi\Pi$ цепях. В обозначениях зондов первая цифра соответствует общему числу катушек, буква Φ означает, что зонд фокусирующий, последняя цифра обозначает длину зонда. Например, индукционный зонд $4\Phi0,75$ – четырех катушечный, фокусирующий длиной 0,75 *м*.

Фокусирование заключается в том, что, подбирая число витков в дополнительных фокусирующих катушках, их расположение относительно главных и направление включения, добиваются уменьшения относительного вклада некоторых областей среды в наблюдаемый сигнал.

Фокусирующие катушки включаются последовательно с главными, но их витки намотаны противоположно виткам генераторной и измерительной катушек. Число дополнительных катушек, их взаимное положение и число витков должны быть такими, чтобы в значительной мере было исключено влияние скважины, зоны проникновения и вме-

щающих пород, а измеряемая эффективная электропроводность была как можно ближе к истинному значению электропроводности пласта.

48

По расположение фокусирующих катушек различают зонды:

 с внутренней фокусировкой – фокусирующие катушки расположены в интервале между главными, при этом в основном улучшается радиальная характеристика зондов, т.е. уменьшается влияние скважины, и в некоторой степени – зоны проникновения;

 с внешней фокусировкой – дополнительные катушки находятся вне интервала между главными, при этом улучшается вертикальная разрешающая способность зондов, уменьшается влияние ограниченной толщины пласта и вмещающих пород;

 со смешанной фокусировкой – фокусирующие катушки расположены как вне главной пары, так и внутри ее.

Фокусирующие катушки служат также для исключения в измерительной катушке ЭДС прямого поля, индуцируемого генераторной катушкой. По степени компенсации прямого поля различают нулевые зонды, ЭДС которых в непроводящей, немагнитной среде (в воздухе) в измерительной цепи равна нулю, т. е. прямое поле скомпенсировано, и некомпенсированные зонды, у которых в воздухе наблюдается значительная реактивная ЭДС.



Рис.3.27. Расположение катушек в зондах ИК:

а – зонд 4ФО,75 (annapamypa ПИК-1); б – зонд 6Ф1 (АИК-3)

Радиальные и вертикальные характеристики зондов ИК

Глубинность исследования зондов индукционного метода по вертикали и горизонтали определяют их радиальные и вертикальные характеристики, называемые также графиками интегрального радиального и интегрального вертикального геометрических факторов. Эти характеристики получены на основании приближенной теории Долля.

В соответствии с принципом суперпозиции многокатушечный зонд может быть представлен двухкатушечными парами: генератор-измеритель. Сигнал в многокатушечном зонде равен алгебраической сумме сигналов всех возможных сочетаний двухкатушечных пар. В связи с этим рассмотрим характеристики двухкатушечного зонда.

В случае пласта большой толщины электропроводность среды по вертикали постоянна, а по радиусу изменяется. В этом случае неоднородное пространство в радиальном направлении можно рассматривать как состоящее из однородных тонких цилиндрических элементарных слоев различной электропроводности. Аналогично пространственному фактору элементарных колец Х. Г. Долль ввел понятие *геометрического фактора тонкого цилиндрического*

слоя g_r , который определяется следующим образом $g_r = \int_{-\infty}^{+\infty} g dr$.

Зависимость g_r от радиуса цилиндра показывает относительное влияние тонких цилиндрических слоев разного радиуса на величину сигнала (рис.3.28,а). При r << L значение пространственного фактора растет прямо пропорционально радиусу, при r = 0,45L она становится максимальной, а при дальнейшем увеличении радиуса – плавно стремится к нулю. Из графика $g_r = f(r)$ (рис.3.28, а) следует, что наибольший вклад в сигнал вносят цилиндрические слои с радиусом, равным около половины длины зонда. Цилиндрические слои с очень малым и большим радиусами вносят небольшой вклад в полный сигнал. Основную долю сигнала образуют концентрические слои, заключенные между цилиндрами с радиусами 0,4L и 1,5L.

При малой толщине пласта и при $dc \rightarrow 0$, и отсутствии зоны проникновения фильтрата промывочной жидкости электропроводность среды в радиальном направлении можно принять одинаковой, а пространство по вертикали разбить на элементарные плоскопараллельные горизонтальные тонкие слои. Каждый такой слой характеризуется *вертикальным геометрическим фактором* g_z , который равен сумме геометрических факторов всех единичных колец, имеющих одну и ту же координату *z*.

Зависимость g_z от z (рис.3.28, б) показывает относительное влияние тонких слоев на величину сигнала в зависимости от расстояния от центра зонда. Если бесконечно тонкий слой находится между генераторной и приемной катушками, т. е. в пределах длины зонда, то влияние этого слоя на величину сигнала будет постоянным. При расположении бесконечно тонкого слоя за пределами катушек его влияние убывает обратно пропорционально z^2 . Пласт, имеющий толщину h = 3L, даст 80 % полного сигнала.



Рис.3.28. Графики геометрических факторов тонкого цилиндрического слоя (а) и тонкого пласта (б) для двухкатушечного зонда

Радиальная характеристика определяется зависимостью интегрального геометрического фактора G_r бесконечного по длине цилиндра от его радиуса r (рис.3.29, а). Из графика следует, что при малых r'_L геометрический фактор возрастает как $(r'_L)^2$, затем рост замедляется и величина геометрического фактора медленно приближается к единице. С помощью этой характеристики для пласта большой толщины можно установить геометрические факторы скважины, зоны проникновения и неизмененной части пласта, а следовательно, узнать по формуле (3.30) ту долю сигнала, которую вносят те или иные участки среды в полный сигнал, а также оценить глубинность исследования индукционного зонда в радиальном направлении. Согласно рис.3.29,а радиус исследования ИК приблизительно равен (1,2 – 1,3)L (зона, из которой поступает 50% сигнала).



Рис.3.29. Графики радиального (а) и вертикального (б) интегральных геометрических факторов для двухкатушечного зонда

Вертикальная характеристика определяется зависимостью интегрального геометрического фактора G_z слоя от толщины пласта h (рис.3.29, б) в случае, когда середина зонда совпадает с серединой пласта. Из графика видно, что при малой величине $\frac{h}{L}$ геометрический фактор пласта возрастает пропорционально его толщине, затем рост замедляется и кривая медленно приближается к единице. С помощью этой характеристики можно приближенно оценить влияние вмещающих пород на показания метода.

Радиальные характеристики позволяют: 1) установить те минимальные диаметры цилиндров, которые не оказывают заметного влияния на сигнал, т. е. диаметры зоны исключения; 2) определить те максимальные диаметры цилиндров, при которых влияние наружной среды весьма незначительно, т. е. глубинность исследования.

Вертикальные характеристики дают возможность: 1) установить ту минимальную толщину пласта, при которой он может быть зафиксирован; 2) определить ту предельную толщину пласта, при которой можно пренебречь влиянием вмещающих пород на величину полного сигнала.

Характеристики многокатушечных зондов получаются путем суперпозиции характеристик двухкатушечных зондов, из которых он состоит.

Как говорилось выше, цель фокусировки уменьшить влияние на показания ИК скважины и вмещающих пород. В рамках теории, использующей геометрический фактор, этому требованию соответствует необходимость уменьшения геометрического фактора области, примыкающей к зонду, и области вне пласта. Для уменьшения геометрического фактора какой-либо области фокусирующие катушки должны быть включены таким образом, чтобы сигналы вычитались.

Оценка влияния скважины наиболее наглядно выполняется по графикам геометрического фактора тонкого цилиндрического слоя и интегрального радиального геометрического фактора. Параметры многокатушечного зонда должны быть выбраны так, чтобы начальная часть графика интегрального радиального геометрического фактора располагалась по возможности ближе к оси абсцисс, т. е. чтобы для цилиндров малого радиуса геометрический фактор был близок к нулю.

Рис.3.30. Графики геометрического фактора тонкого цилиндрического слоя для основного двухкатушечного (1), дополнительного фокусирующего (2) и трехкатушечного (3) зондов:

области: с – скважина, зп – зона проникновения ПЖ, пл – неизмененная часть пласта



На рис. 3.30 приведен пример как получается радиальная характеристика трехкатушечного зонда. График 2 характеризует геометрический фактор дополнительного зонда, образованного основной приемной катушкой и фокусирующей генераторной. Поскольку длина этого зонда L меньше, чем длина основного, то и максимум на кривой g_r смещен ближе к оси скважины. Как видно из графика суммарного сигнала (рис. 3.30, график 3), создаваемого в приемной катушке обеими генераторными катушками, в области скважины геометрический фактор имеет отрицательное значение, что почти полностью исключает влияние скважины, а влияние зоны проникновения (область зп) значительно уменьшается.

Кривые индукционного метода

Кривые $\sigma_{s\phi}$ для всех зондов индукционного метода против одиночных пластов в случае равенства электропроводностей вмещающих пород симметричны относительно середины пласта. Границы пластов при их средней и большой толщине определяются по середине аномалии. Для пластов малой толщины ширина аномалии на ее середине представляет собой фиктивную толщину $h_{\phi} < h$.

Существенными значениями $\sigma_{s\phi}$ против однородного пласта конечной толщины являются экстремальные значения эффективной электропроводности против середины пласта – максимальные или минимальные.

На показания индукционного каротажа искажающее влияние оказывают: 1) явление скин-эффекта; 2) скважина; 3) ограниченная толщина пласта и вмещающие породы; 4) зона проникновения фильтрата промывочной жидкости.

В случае низкой проводимости среды ЭДС активной составляющей прямо пропорциональна ее электропроводности. С ростом электропроводности среды ЭДС активного сигнала увеличивается медленнее и по более сложному закону. Нарушение пропорциональности между активным сигналом и электропроводностью среды связано с взаимодействием вихревых токов. Это явление называется *скин-эффектом*. Чем выше частота тока и электропроводность среды, тем значительнее взаимодействие вихревых токов и, следовательно, существеннее влияние скин-эффекта на показания индукционного метода. Влияние скин-эффекта на показания $\sigma_{3\phi}$ учитывается с помощью графиков $\sigma_{3\phi} = f(\rho_{3\phi})$, построенных по теоретическим формулам для однородной среды. Эти графики позволяют перевести значения электропроводности в величины удельного сопротивления пород.

Влияние скважины на показания индукционного каротажа в общем случае зависит от диаметра скважины, сопротивления промывочной жидкости и отношения $\rho n / \rho c$. Согласно радиальным характеристикам зондов ИК при обычных значениях диаметра скважины (200–300 *мм*), ее влияние мало и практически не учитывается при $\rho c > 1 O M \cdot M$. В случае высокоминерализованной про-

мывочной жидкости и высокого сопротивления пород влияние скважины становится заметным.

Влияние зоны проникновения на результаты ИК невелико при повышающем проникновении. Понижающее проникновение оказывает значительное влияние уже при D/dc > 3. С увеличением отношения сопротивления неизмененной части пласта к сопротивлению зоны проникновения влияние понижающего проникновения возрастает.

Области применения низкочастотного индукционного метода

Основным преимуществом метода индукционного каротажа являются благоприятные пространственные характеристики: большой радиус исследования при ограниченной зоне влияния по вертикали. Индукционные зонды сравнительно небольших размеров (0,75–1,40 м) обладают значительным радиусом исследования. Для определения удельного сопротивления пласта ИК применяется в качестве метода с большой глубиной исследования в комплексе с одним или двумя зондами другого типа с малой и средней глубинностью исследования.

ИК позволяет добиться высокой точности результатов измерения в породах с малым удельным сопротивлением (менее 10 *Ом*·*м*), но имеет ограничения при исследовании пород удельного сопротивления свыше 200 *Ом*·*м*.

Этот метод получил широкое распространение при исследовании разрезов нефтяных и газовых скважин с промывочными жидкостями сравнительно низкой минерализации ($\rho c >0,5 \ Om \cdot m$). Кроме того, он может использоваться при изучении скважин с непроводящей промывочной жидкостью (известковобитумные растворы и др.), заполненных нефтью и закрепленных трубами из диэлектриков (асбоцементные и полимерные обсадные колонны).

Применение низкочастотного индукционного метода ограничено в случае использования соленых промывочных жидкостей и наличия зоны проникновения фильтрата промывочной жидкости понижающей сопротивление пласта.

Индукционный метод наиболее чувствителен к прослоям повышенной электропроводности и почти не фиксирует прослои высокого удельного сопротивления, т. е. при замерах $\sigma_{s\phi}$ отсутствует явление экранирования, присущее обычным зондам КС.

Низкочастотный индукционный метод позволяет более детально расчленять разрезы скважин, сложенные породами низкого удельного сопротивления, выделять водоносные и нефтегазоносные пласты, изучать строение переходной зоны и уточнять положение контактов "вода–нефть", "вода–газ".

3.8. Высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование

Для точной оценки величины удельного электрического сопротивления пластов применяют фокусирующие зонды ИК. При геометрической фокусировке моменты катушек и расстояния между ними выбираются таким образом, чтобы уменьшить вклады скважины и зоны проникновения. Достигаемое таким образом улучшение радиальной характеристики приводит к возникновению двух проблем:

1) увеличивается влияние на полезный сигнал вмещающих пород – ухудшается вертикальная характеристика аппаратуры ИК;

2) значительно уменьшается уровень измеряемого сигнала – ухудшается соотношение – полезный сигнал / шум прибора.

В результате при геометрической фокусировке возникают противоречивые требования к проектированию аппаратуры ИК. Для того чтобы сохранить полезный сигнал, надо повышать частоту работы прибора или уменьшать длину зонда. Для улучшения радиальных характеристик надо снижать частоту и увеличивать длину зонда.

В методе высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования (ВИКИЗ) использован другой способ фокусировки переменного электромагнитного поля в области высоких частот. Установлено, что относительная разность фаз, измеренная в двух близко расположенных катушках слабо зависит от параметров скважины, следовательно, измерение разности фаз позволяет достичь сразу двух целей: исключить влияние скважины и получить хорошее вертикальное разрешение.

Высокие рабочие частоты, применяемые в аппаратуре ВИКИЗ, позволяют получить достаточно большие сигналы в средах с удельным сопротивлением до 120 *Ом*·*м*.

Принцип измерений в методе ВИКИЗ. Изопараметрические зонды

В методе ВИКИЗ для измерения относительных характеристик электромагнитного поля используются трехкатушечные зонды. Зонд состоит из генера-

торной (Γ) и двух измерительных катушек (U_1 , U_2). Измерительные катушки расположены по одну сторону от генераторной (рис.3.31). Расстояние между центрами генераторной и дальней измерительной катушкой называется длиной зонда L. Расстояние между центрами измерительных катушек называется базой зонда ΔL .

Переменный электрический ток в генераторной катушке возбуждает в



Рис.3.31. Расположение генераторной и измерительных катушек

проводящей среде переменное электромагнитное поле. Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея-Максвелла, это переменное электромагнитное поле наводит в измерительных катушках электродвижущуюся силу (ЭДС), которая пропорциональна удельной электропроводности горных пород. В методе ВИКИЗ измеряется *разность фаз* $\Delta \phi$ между двумя ЭДС, возникающими в двух

измерительных катушках. Зависимость разности фаз $\Delta \phi$ от сопротивления для однородной среды для метода ВИКИЗ приведена на рис. 3.32. Зависимость носит нелинейный характер. В диапазоне измерения удельного электрического сопротивления от 1 до 10 *Ом*·*м* наблюдается максимальная чувствительность метода ВИКИЗ. При пересчете фаз в значения сопротивления в плохопроводящих средах имеют место максимальные ошибки.

Разность фаз в однородной среде будет одинаковой для различных зондов и будет зависеть только от сопротивления среды, если выполняются два условия:

1.
$$\sqrt{f} \cdot L = const$$
; 2. $\frac{\Delta L}{L} = const$



Рис.3.32. Зависимость разности фаз от удельного электрического сопротивления однородной среды для зондов ВИКИЗ

Зонды, для которых выполняются эти условия, называют *изопараметрическими*, т.е. они имеют одинаковую характеристику по однородной среде, одинаковую поправку за скин-эффект.

Аппаратура ВИКИЗ

В аппаратуре ВИКИЗ используется пять электромагнитных зондов, обладающих геометрическим и электродинамическим подобием со следующими изопараметрами:

$$\sqrt{f} \cdot L = \sqrt{3.5} \cdot 10^3$$
; $\frac{\Delta L}{L} = 0.2$.

Обеспечивается одновременное измерение разности фаз между ЭДС, наведенными в измерительных катушках пяти зондов и потенциала самопроизвольной поляризации ПС. Конструктивно зондовое устройство выполнено на едином стержне, и все катушки размещены соосно. Всего в зонде ВИКИЗ имеется пять генераторных и шесть измерительных катушек, размещенных как показано

на рис. 3.31. Характеристики зондов ВИКИЗ приведены в таблице.

Все генераторные и измерительные катушки зондов меньшей длины размещены между катушками двухметрового зонда. Зонды как бы вложены друг в друга. За счет этого общая длина прибора составляет всего 4 м. Диаметр прибора составляет 73 мм.

Схема зонда	Длина, м	База, м	Рабочая частота, кГц
И6 0,40 И5 1,60 Г5	2,00	0,40	875
И5 0,28 И4 1,13 Г4	1,41	0,28	1750
И4 0,20 ИЗ 0,80 ГЗ	1,00	0,20	3500
ИЗ 0,14 И2 0,57 Г2	0,71	0,14	7000
И2 0,10 И1 0,40 Г1	0,50	0,10	1400

Характеристики зондов ВИКИЗ

Кривые зондов ВИКИЗ и их интерпретация

Для литологического расчленения разреза диаграммы ПС и ВИКИЗ должны быть дополнены данными радиоактивных методов ГК и НКТ. Зонды ВИКИЗ отличаются радиальной глубинностью исследования. Это позволяет по данным зондов ВИКИЗ обнаруживать радиальный градиент сопротивления и по этому признаку выделять пласты-коллекторы.

На рис.3.33 коллекторы АС₄ и АС₅₋₆ по данным ВИКИЗ выделяются ярко выраженной понижающей зоной проникновения. Высокие показания НКТ в пласте АС₅₋₆ указывают на наличие остаточного газа в радиусе исследования нейтронными методами. Следовательно, пласты АС₄ и АС₅₋₆ газонасыщенные. В нефтесодержащих коллекторах АС₇₋₈ наблюдается более сложная картина проникновения. Изменения значений сопротивления с после-



Рис.3.33. Диаграммы ВИКИЗ, ПС, ГК, НКТ в меловых отложениях с продуктивными пластами АС

довательным уменьшением от короткого зонда к длинному являются характерным признаком водоносных коллекторов.

Для качественных оценок характера насыщения коллекторов принципиальное значение имеют сведения о значениях критических величин УЭС продуктивных коллекторов. Подошвенная часть пласта AC_{7-8} является водоносной, на это указывают данные бокового индукционного зондирования (БИЗ) и значения сопротивления зондов 1,4; 2,0 м около 2,5 *Ом*·*м*, меньше критического значения. В верхней части продуктивного пласта AC_{7-8} нефтенасыщенность максимальная и значения УЭС пласта выше 10 *Ом*·*м*. Ниже водонасыщение коллектора увеличивается и сопротивление пласта снижается до 5 *Ом*·*м*.

Таким образом, для оценки характера насыщения коллекторов помимо

значений УЭС, которые рассчитываются по данным зондов ВИКИЗ, используется и результаты анализа характера изменения кривых ВИКИЗ (данных бокового индукционного зондирования).

Возможности и ограничения ВИКИЗ

Благоприятные условия измерения для ВИКИЗ – скважины, заполненные «пресной» промывочной жидкостью с $\rho c > 0,5 \ Om \cdot m$, где УЭС пластов не превышает 100 $Om \cdot m$. В этом случае ярко проявляются достоинства ВИКИЗ:

1. Хорошая вертикальная разрешающая способность, которая в два раза выше, чем у приборов индукционного каротажа.

2. «Наглядность» метода. Визуальный анализ пяти электродинамически подобных зондов, с одинаковой поправкой за скин-эффект позволяет интерпретатору быстро установить характер проникновения в пласте-коллекторе и оценить его насыщение на качественном уровне. Это весьма важно при проведении оперативной интерпретации.

Влияние эксцентриситета прибора в «пресной» скважине проявляется на показаниях двух коротких зондов 0,5 и 0,7 м и увеличивается с увеличением УЭС пласта. Оно проявляется в занижении эффективного сопротивления по данным коротких зондов. В наибольшей степени влияние скважины на показания зондов ИК проявляется в скважинах, заполненных высокоминерализованной промывочной жидкостью с $\rho c < 0,1 \ Om M$.

На рис. 3.34 приведены кривые эффективных сопротивлений для пласта с сопротивлением 20 *Ом*·*м* при соосном и смещенном положении прибора в сква-



Рис.3.34. Влияние эксцентриситета прибора в скважине:

1 — 4 — расположение прибора (1 — центр, 2смещение 0,03 м, 3 — 0,05 м, 4 — 0,06 м)

жине с $\rho c < 0,1$ *Ом*·*м*. Смещение прибора с оси скважины влияет на показания зондов 0,5; 0,7; 1,0 м, занижая значения замеряемого сопротивления.

Условия для измерения ВИКИЗ в «соленых» скважинах с $\rho c < 0,1 \ Ommeta M$ являются неблагоприятными. При этом наблюдаются следующие эффекты:

1. Существенно увеличивается влияние скважины.

2. Появляется понижающая зона проникновения

3. Резко увеличиваются погрешности измерения, обусловленные сильным затуханием амплитуды электромагнитного отклика.

4. При *ρп /ρc* > 500 на диаграммах ВИКИЗ проявляются влияние неровностей стенок скважины, помехи, связанные с движением прибора и изменением его положения относительно стенок скважины.

Все вышеизложенное приводит к тому, что точность определения сопро-

тивления пластов выше 15–20 *Ом*·*м* в «соленых» скважинах резко уменьшается. Наиболее неблагоприятные условия измерения для ВИКИЗ – высокоомные пласты с сопротивлением выше 30 *Ом*·*м* с понижающей зоной проникновения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обязательным этапом после выхода скважины из бурения является проведение электрического каротажа, который позволяет расчленить разрез по электрическим свойствам, выделить продуктивные коллекторы и определить радиальные геоэлектрические характеристики пласта и зоны проникновения.

Оценка удельного электрического сопротивления пород, пересеченных скважиной, является одной из самых важных и актуальных задач, от решения которой в итоге зависят точность подсчета запасов углеводородов и рентабельность месторождения в целом.

По данным методов электрометрии, используя современные средства регистрации и обработки данных каротажа, получают истинное сопротивление продуктивных пластов с высокой точностью. При выборе метода, с помощью которого определяется истинное сопротивление пласта, не затронутого проникновением фильтрата промывочной жидкости, предпочтение отдается наиболее глубинным методам исследования. Для изучения изменения сопротивления в радиальном направлении от скважины вглубь пласта и оценки радиуса зоны проникновения в настоящее время используются комплекты разноглубинных зондов. При этом вместо метода БКЗ, основным недостатком которого являются зависимость вертикальной разрешающей способности от размера зонда и искажения значений кажущегося сопротивления в пластах из-за эффектов экранирования, предпочтение отдается многозондовым приборам ИК и аппаратуре ВИКИЗ. Сопротивление пласта и зоны проникновения при интерпретации этих методов определяется в непрерывном варианте не по палеткам, а на основе решения прямых задач с последующей минимизацией функционала, что в свою очередь повышает точность расчетов. При исследовании боковых, наклонно направленных и горизонтальных скважин, количество которых в последнее время значительно возрастает, автономной аппаратурой на буровом инструменте использование традиционных методов КС неэффективно из-за конструкции и размеров. Поэтому при исследовании таких скважин используются новые разработки фокусированных методов электромагнитного и бокового каротажа.

Список литературы

1. Антонов Ю. Н., Эпов М. И. ВИКИЗ в вертикальных и горизонтальных скважинах // Каротажник: науч.-техн. вестник. – Тверь: ГЕРС, 2005. – Вып.1.

- 2. Вендельштейн Б.Ю. Исследование разрезов нефтяных и газовых скважин методом собственных потенциалов. М.: Недра, 1966.
- 3. Дахнов В.Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин: учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. М.: Недра, 1981.
- 4. Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований скважин: учебник для вузов. – Изд. 2-е, перераб. – М.: Недра, 1982.
- 5. Дворкин В. И., Метелкин В. И., Зиннуров Р. М. и др. Исследования методом индукционного каротажа в процессе бурения // Каротажник: науч.-техн. вестник. Тверь: ГЕРС, 2005. Вып. 10-11.
- 6. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю. Резванов Р.А. Африкян А.Н. Промысловая геофизика: учебник. – М.: Изд-во «Нефть и газ», 2004. – 400 с.
- 7. Дьяконов Д.И., Леонтьев Е.И., Кузнецов Г.С. Общий курс геофизических исследований скважин. М.: Недра, 1988.
- 8. Ильинский В.М. Боковой каротаж. М.: Недра, 1971.
- 9. Итенберг С.С. Интерпретация результатов геофизических исследований скважин: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1987.
- 10. Кнеллер Л.Е., Потапов А.П. Электрические, электромагнитные методы и программное обеспечение определения сопротивлений на основе моделирования // Каротажник: науч.-техн. вестник. Тверь: ГЕРС, 2006. Вып.7-8.
- 11. Комаров С.Г. Геофизические методы исследования скважин. М.: Недра, 1973.
- 12. Кормильцев В.Н., Ратушняк А.Н. Адсорбционный потенциал и теория ПС в газовых скважинах // Каротажник: науч.-техн. вестник. Тверь: ГЕРС, 2005. Вып.12-13.
- 13. Миколаевский Э. Ю., Архипова И. Ю., Сохранов Н. Н. Методика и алгоритмы выделения переходной зоны и определения водонефтяных контактов по данным электрического и электромагнитного каротажа // Каротажник: науч.-техн. вестник. – Тверь: ГЕРС, 2005. – Вып. 1.
- 14. Никитенко М. Н., Шлык А. В. Новый подход к оценке удельного сопротивления пластов по данным ВИКИЗ // Каротажник: науч.-техн. вестник. – Тверь: ГЕРС, 2005. – Вып. 8.
- 15. Плюснин М.И. Индукционный каротаж. М.: Недра, 1968.
- 16. Померанц Л. И. Геофизические методы исследования скважин. М.: Недра, 1981. 376 с.
- 17. Электрические и электромагнитные методы исследования в нефтегазовых скважинах: материалы научно-практической конференции. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
- 18. Эпов М.И., Антонов Ю.Н. Технология исследования скважин на основе ВИКИЗ (методическое руководство). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	1
1. Характеристика объекта геофизического исследования	2
2. Удельное электрическое сопротивление горных пород	4
3. Электрические методы исследования скважин	7
3.1. Метод потенциалов собственной поляризации	8
3.2. Каротаж сопротивления обычными зондами	18
3.3. Боковое каротажное зондирование	
3.4. Микрокаротаж	
3.5. Боковой каротаж	
3.6. Боковой микрокаротаж	40
3.7. Индукционный каротаж	43
3.8. Высокочастотное индукционное каротажное	
изопараметрическое зондирование	54
Заключение	58
Список литературы	