

**ИССЛЕДОВАНИЕ  
РАЗРЕЗОВ  
НЕФТЯНЫХ  
И ГАЗОВЫХ  
СКВАЖИН  
МЕТОДОМ  
СОБСТВЕННЫХ  
ПОТЕНЦИАЛОВ**

**Б.Ю. Венгельштейн**

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЕЗОВ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН МЕТОДОМ СОБСТВЕННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

Б. Ю. ВЕНДЕЛЬШТЕЙН

*Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по специальностям „Геология и разведка нефтяных и газовых месторождений“ и „Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых“*

Под редакцией доктора геолого-минералогических наук  
профессора В. Н. ДАХНОВА



ИЗДАТЕЛЬСТВО „НЕДРА“  
Москва 1966

## А Н Н О Т А Ц И Я

Настоящая книга является учебным пособием по соответствующим разделам курсов «Физические свойства горных пород», «Теория электрических и магнитных методов исследования скважин» и «Интерпретация результатов геофизических исследований скважин» для студентов геофизической специальности геолого-разведочных факультетов вузов и техникумов нефтяной и газовой промышленности. Книга представляет также интерес для инженеров-геофизиков и геологов, занимающихся вопросами интерпретации данных промысловой геофизики и изучением физических свойств горных пород.

*РЕЦЕНЗЕНТЫ:* кафедра геофизических методов разведки Казанского Государственного университета им. В. И. Ленина; канд. техн. наук, ст. научный сотрудник лаборатории инженерной геологии и геофизики ЦНИИС В. А. РЯПОЛОВА.

## ВВЕДЕНИЕ

Метод потенциалов собственной (самопроизвольной, естественной) поляризации (метод СП, ПС, PS) горных пород был предложен французским ученым К. Шлюмберже в 1926 г. для изучения разрезов нефтяных скважин. На основании результатов наблюдений, методом СП, выполненных на нефтяных скважинах Азнефти в 1931 г., была впервые установлена зависимость потенциалов естественной поляризации от литологии пород, вскрываемых скважиной. В начале 30-х годов началось широкое внедрение этого метода как в Советском Союзе, так и за рубежом.

Первые работы по анализу диаграмм, полученных в скважинах, а также по изучению потенциалов диффузионного и фильтрационного происхождения на образцах пород в лаборатории были выполнены в 30-х годах советскими специалистами: В. Н. Дахновым, В. А. Сулиным, А. Н. Снарским, И. Я. Фурманом, С. Г. Комаровым, Т. М. Шаниной, А. Г. Самарцевым и В. В. Остроумовым. В этот же период В. Р. Бурсианом, Л. М. Альпиным и С. М. Шейнманом были созданы основы теории естественных электрических полей в скважине.

Более глубокие исследования природы потенциалов диффузионного, фильтрационного и окислительно-восстановительного происхождения и методики геологической интерпретации диаграмм этого параметра были проведены в 40—60-е годы настоящего столетия. Эти работы обеспечили возможность широкого использования метода потенциалов собственной поляризации для изучения геологических разрезов скважин, при подсчетах запасов нефти и газа, составлении проектов разработки месторождений этих ископаемых и сооружений подземных хранилищ газа и т. п. Среди этих работ следует отметить исследования, выполненные В. Н. Кобрановой, Б. Ю. Вендельштейном, В. М. Добрыниным, И. А. Копосовым и др. под руководством В. Н. Дахнова (МИНХ и ГП, ранее МНИ), А. М. Нечаем (Грознефтегеофизика), И. Е. Эйрманом (Нижневолго-нефтегеофизика), Д. А. Шапиро (Татнефтегеофизика), А. И. Крибари (КФ АН СССР), И. Ю. Лепешинским (Казанский университет), С. А. Султановым и его сотрудниками (ТатНИИ), З. К. Козиной, Д. А. Мельниковым и В. П. Шмаровой (ВНИИ Геофизика), Л. П. Долиной (ВНИИ Нефть), К. А. Грудкиным (Ташкентский геофизический трест),



В. М. Волковой, В. Н. Луговой, С. П. Каменевым (Сахалинский геофизический трест), Е. И. Леонтьевым (СНИИГГИМС), А. М. Бедчером (КФ ВНИИ), А. П. Анпиловым (Волгоуральский филиал ВНИИГеофизики), В. А. Ряполовой (ЦНИИС) и многими другими.

В эти же годы исследования различных вопросов теории и природы потенциалов собственной поляризации были проведены коллективами зарубежных специалистов. Наиболее важными из этих исследований являются работы Г. Доля, М. Мартена, М. Магата, М. Вилли, Х. Хилла, И. Милберна, М. Гондуэна, М. Тиксье, А. Андерсона, К. Скала, Ж. Симарда, А. Уорсингтона, Р. Мельдо.

В первой главе настоящей книги изложены физические основы метода. Во второй главе — дана краткая теория поля потенциалов собственной поляризации пород в скважине и описаны условия регистрации диаграмм  $U_{\text{СП}}$ . В третьей главе рассмотрены вопросы геологической интерпретации данных этого метода, которые иллюстрированы рядом примеров из практики.

Ввиду небольшого объема издания автор не имел возможности рассмотреть ряд вопросов, как, например, связь естественной электрохимической активности пород с их вызванной активностью и естественной радиоактивностью и др. По этой же причине некоторые разделы освещены сжато и большая часть уравнений дана без вывода.

Автор выражает благодарность всем специалистам, предоставившим материалы для опубликования в данной работе.

Глубокую признательность автор приносит научному редактору книги проф. В. Н. Дахнову, рецензентам канд. геолого-минер. наук И. Ю. Лепешинскому и канд. техн. наук В. А. Ряполовой за ряд ценных указаний, учтенных при окончательной подготовке рукописи к изданию.

Большая помощь в подготовке рукописи к изданию была оказана сотрудниками кафедры промышленной геофизики МИНХ и ГП: К. Х. Бендзко, А. С. Горбенко, П. И. Дворецким, В. И. Петерсилье.

---

## Глава I

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ПОТЕНЦИАЛОВ СОБСТВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

### § 1. ДИФФУЗИОННЫЕ Э. Д. С.

При непосредственном контакте водных растворов электролитов различной концентрации происходит диффузия ионов из раствора большей концентрации в разбавленный раствор. Поскольку подвижности ионов неодинаковы, менее концентрированный раствор приобретает по отношению к более концентрированному заряд, знак которого соответствует знаку заряда, перенесенного более подвижными ионами. В случае соприкосновения растворов бинарного электролита на их границе возникает э. д. с., определяемая формулой В. Нернста:

$$E_d = \frac{RT}{F} \frac{n_K u - n_A v}{n_K z_K u + n_A z_A v} \ln \frac{C_1}{C_2}. \quad (1)$$

Здесь  $R = 8,31 \frac{\text{дж}}{\text{град} \cdot \text{моль}}$  — универсальная газовая постоянная;  $F = 96494 \frac{\kappa}{\text{моль}}$  — число Фарадея;  $T$  — абсолютная температура растворов в градусах Кельвина  $^{\circ}\text{K}$ ;  $n_K$  и  $n_A$  — количество катионов и анионов, на которые диссоциирует одна молекула электролита;  $z_K$  —  $z_A$  — валентности катиона и аниона;  $u$  и  $v$  — электролитические подвижности катиона и аниона в  $\text{ом}^{-1} \cdot \text{см}^2$ ;  $C_1$  и  $C_2$  — эквивалентные концентрации электролита в растворах «1» и «2»;  $E_d$  — диффузионная э. д. с. в в.

При данной последовательности индексов под знаком логарифма величина  $E_d$  характеризует разность потенциалов между растворами «2» и «1». Для однооноовалентного электролита  $z_K = z_A = 1$ ,  $n_K = n_A = 1$  и формула (1) упрощается:

$$E_d = \frac{RT}{F} \frac{u - v}{u + v} \ln \frac{C_1}{C_2}. \quad (2)$$

После подстановки в формулу (2) числовых значений  $R$  и  $F$  при  $T = 291^\circ \text{ K}$  ( $t = 18^\circ \text{ C}$ ) получим:

$$E_d = 58 \frac{u-v}{u+v} \lg \frac{C_1}{C_2} = 58 (N_k - N_a) \lg \frac{C_1}{C_2} [\text{мВ}], \quad (3)$$

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

Из формул (1) — (3) следует, что обязательными условиями возникновения диффузионной э. д. с. являются различие концентраций растворов ( $C_1 \neq C_2$ ) и подвижностей ионов ( $u \neq v$ ). При  $C_1 = C_2$  или  $u = v$  разность потенциалов отсутствует.

В частном случае для растворов NaCl при среднем значении  $N_k - N_a = -0,2$

$$E_d = -11,6 \ln \frac{C_1}{C_2} [\text{мВ}]. \quad (4)$$

В формулах (1) — (4) множитель перед логарифмом  $K_d$  называется коэффициентом диффузионной э. д. с.

Тогда, в общем виде:

$$E_d = K_d \lg \frac{C_1}{C_2}. \quad (5)$$

Величина  $K_d$  при  $T = \text{const}$  зависит от химического состава соприкасающихся электролитов.

В табл. 1 приведены значения  $K_d$  при  $T = 291^\circ \text{ K}$  ( $t = 18^\circ \text{ C}$ ) для наиболее распространенных солей, присутствующих в пластовых водах нефтяных и газовых месторождений.

Таблица 1

| Электролит                      | Среднее значение $K_d$ |
|---------------------------------|------------------------|
| NaCl                            | -11,6                  |
| NaHCO <sub>3</sub>              | +2,2                   |
| CaCl <sub>2</sub>               | -19,7                  |
| MgCl <sub>2</sub>               | -22,5                  |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | +5                     |
| KCl                             | -0,4                   |

При относительно невысоких концентрациях  $C$  отношение концентраций под знаком логарифма в формуле (5) можно заменить обратным отношением удельных сопротивлений растворов:

$$E_d = K_d \lg \frac{\rho}{\rho_1}. \quad (6)$$

Зависимость коэффициента  $K_d$  от абсолютной температуры растворов приближенно определяется формулой

$$K_{d2} = K_{d1} \frac{T_2}{T_1}, \quad (7)$$

где  $K_{д1}$  и  $K_{д2}$  — значения коэффициента диффузионной э. д. с. при температурах  $T_1$  и  $T_2$ . В действительности эта зависимость несколько сложнее, так как подвижности различных ионов неодинаково изменяются с увеличением температуры.

Для практических целей удобнее пользоваться формулами

$$K_{д2} = K_{д1} \frac{t_2 + 273}{t_1 + 273}, \quad (8)$$

$$K_{дt} = K_{д18^\circ \text{C}} \frac{t + 273}{291}, \quad (9)$$

где  $K_{дt^\circ \text{C}}$  и  $K_{д18^\circ \text{C}}$  — значения коэффициента диффузионной э. д. с. при температуре  $t^\circ \text{C}$  и  $18^\circ \text{C}$ .

В случае контакта двух растворов различных бинарных одновалентных электролитов выражение для диффузионной э. д. с. было получено М. Планком [90] на основе интегрирования дифференциальных уравнений диффузии катионов и анионов:

$$\frac{\partial C_{кi}}{\partial t} = u_i R \frac{\partial^2 C_{кi}}{\partial x^2} + u_i e \frac{\partial}{\partial x} \left( C_{кi} \frac{\partial U}{\partial x} \right), \quad (10)$$

$$\frac{\partial C_{аi}}{\partial t} = v_i R \frac{\partial^2 C_{аi}}{\partial x^2} - v_i e \frac{\partial}{\partial x} \left( C_{аi} \frac{\partial U}{\partial x} \right). \quad (11)$$

Здесь  $x$  — координата исследуемой точки в направлении диффузии;  $t$  — время,  $e = 1,59 \cdot 10^{-19}$  СГСЕ (заряд электрона);  $C_{кi}$  и  $C_{аi}$  — концентрация  $i$ -го катиона и аниона,  $u_i$  и  $v_i$  — их подвижности;  $U$  — потенциал электрического поля диффузии.

Решение дифференциальных уравнений типа (10), (11) для всех электролитов, присутствующих в растворах I, II, имеет следующий вид:

$$E_d = \frac{RT}{F} \ln \eta, \quad (12)$$

где  $\eta$  определяется из уравнения

$$\frac{\eta U_{II} - U_I}{V_{II} - V_I \eta} = \frac{\ln \frac{C_{II}}{C_I} - \ln \eta}{\ln \frac{C_{II}}{C_I} + \ln \eta} \frac{\eta C_{II} - C_I}{C_{II} - \eta C_I}. \quad (13)$$

Здесь

$$U = \sum_{i=1}^n u_i C_{кi}; \quad V = \sum_{i=1}^n v_i C_{аi}.$$

При контакте растворов разных электролитов одинаковой концентрации

$$E_d = \frac{RT}{F} \ln \frac{u_I + v_{II}}{u_{II} + v_I}. \quad (14)$$

Здесь, как и прежде, индексы I и II относятся к ионам соответствующих растворов.

Формула (14) показывает, что даже при одинаковой концентрации растворов различия в подвижностях разных ионов обеспечивают возникновение диффузионной э. д. с. Позднее П. Дебай получил выражение для диффузионной э. д. с., используя формулы А. Эйнштейна для броуновского движения [86].

П. Гендерсон при выводе уравнения для диффузионной э. д. с. на контакте растворов со сложным составом электролитов исходил из предположения о наличии между растворами переходного слоя, где концентрация каждого сорта электролита из растворов I и II изменяется линейно [88]. Применяв термодинамический путь решения задачи, он получил уравнение

$$E_d = \frac{RT}{F} \frac{(U_I - V_I) - (U_{II} - V_{II})}{(U'_I + V'_I) - (V'_{II} + V'_{II})} \ln \frac{U'_I + V'_I}{U'_{II} + V'_{II}}, \quad (15)$$

где

$$U = \sum_{i=1}^n n_{ki} C_i u_i; \quad U' = \sum_{i=1}^n n_{ki} z_{ki} C_i u_i;$$

$$V = \sum_{i=1}^n n_{ai} C_i v_i; \quad V' = \sum_{i=1}^n n_{ai} z_{ai} C_i v_i.$$

Значения  $n_{ki}$ ,  $z_{ki}$ ,  $n_{ai}$ ,  $z_{ai}$  — те же, что в формуле (1); индексы I и II относятся к соответствующим растворам;  $i$  — порядковый индекс иона. В случае контакта двух растворов различных электролитов в соответствии с (15) имеем:

$$E_d = \frac{RT}{F} \frac{(u_I - v_I) - (u_{II} - v_{II})}{(u_I + v_I) - (u_{II} + v_{II})} \ln \frac{u_I + v_I}{u_{II} + v_{II}}. \quad (16)$$

Таким образом, величину  $E_d$  на границе двух растворов со сложным химическим составом можно рассчитать двумя способами, причем в результате получаются различные, хотя и близкие значения. Совместный анализ уравнений Планка и Гендерсона позволяет отметить следующее.

1. Для случая бинарного электролита уравнения (12) и (15) превращаются в уравнение (1).

2. Уравнение (12) получено более строго, исходя из классического закона диффузии. Однако допущение о наличии промежуточного слоя, возникающего при соприкосновении растворов с различным составом электролитов в результате их смешивания, принятое при выводе (15), является весьма правдоподобным.

Можно предположить, что уравнение (15) определяет диффузионную э. д. с. в начальный момент соприкосновения растворов, тогда как уравнение (12) описывает  $E_d$ , наблюдаемую при установившемся процессе диффузии, спустя более продолжительное время. В общем случае измеряемые экспериментально э. д. с. должны иметь промежуточные значения между рассчитываемыми по уравнениям (12) и (15).

3. Расчеты по уравнению (15) проще. Систему уравнений (12) и (13) приходится решать графически. Кроме того, уравнение (12) позволяет рассчитать э. д. с. только в частном случае, когда в растворах присутствуют одновалентные электролиты. Следовательно, эти уравнения не дают возможности учесть влияния на величину  $E_d$  электролитов, содержащих многовалентные ионы, распространенные в пластовых водах нефтяных и газовых месторождений. Для общего случая решение Планка значительно усложнится. Очевидно, для практических целей и в первую очередь для качественной оценки влияния отдельных солевых компонент в каждом из растворов на величину  $E_d$  целесообразнее использовать формулу (15).

В растворах сильных электролитов необходимо учитывать изменение подвижностей ионов с изменением общей концентрации растворов или отличие активной концентрации  $a$  ионов от их действительной концентрации  $C$ .

При расчетах диффузионной э. д. с. по формулам (4) — (5), (12), (15) можно:

1) использовать значения подвижностей ионов  $u_\infty$  и  $v_\infty$  для бесконечного разведения и активные концентрации электролитов  $a$ :

$$a = f_a C, \quad (17)$$

где  $f_a$  — коэффициент активности, зависящий от общей концентрации раствора, концентрации того сорта ионов, для которого вычисляется величина  $a$ , и от химического состава раствора [70]. Обычно  $f_a < 1$ ;

2) использовать фактические значения  $C$  отдельных компонент раствора и величины  $u$  и  $v$ , соответствующие общей концентрации раствора и его химическому составу.

Обычно  $u < u_\infty$ ,  $v < v_\infty$ . Отличие значений  $u$ ,  $v$  от  $u_\infty$  и  $v_\infty$  и от  $C$  обусловлено электростатическим взаимодействием ионов в растворах сильных электролитов.

Расчет диффузионной э. д. с. по уравнению (15) позволяет выяснить влияние неоднородного состава солей в растворах на величину коэффициента  $K_d$  диффузионной э. д. с. В табл. 2а и 2б приводятся результаты расчетов, выполненных для контакта двух растворов с десятикратным соотношением их суммарных концентраций в эквивалентной форме. Расчет произведен для электролитов, наиболее типичных для пластовых вод нефтяных и газовых месторождений и бурового раствора.

I. Растворы содержат  $\text{NaCl}$  и  $\text{CaCl}_2$ . Рассматриваются два варианта: а)  $\text{NaCl}$  и  $\text{CaCl}_2$  имеются в обоих растворах; б) разбавленный раствор содержит только  $\text{NaCl}$ , концентрированный —  $\text{NaCl}$  и  $\text{CaCl}_2$ .

Данные табл. 2а показывают, что рост содержания в растворах  $\text{CaCl}_2$  приводит к увеличению отрицательных значений  $K_d$ . Влияние добавок  $\text{CaCl}_2$  существеннее, если они присутствуют только в концентрированном растворе.

II. Растворы содержат  $\text{NaCl}$  и  $\text{NaHCO}_3$ . Рассматриваются три варианта: а)  $\text{NaCl}$  и  $\text{NaHCO}_3$  имеются в обоих растворах; б) разба-

Таблица 2а

| Вариант | Раствор, в котором содержится $\text{CaCl}_2$ | Содержание $\text{CaCl}_2$ , % |       |       |       |       |
|---------|---|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|         |   | 0                              | 10    | 30    | 50    | 100   |
| а       | Концентрированный и разбавленный              | —11,6                          | —16,1 | —18,3 | —19,3 | —19,7 |
| б       | Концентрированный                             | —11,6                          | —15,7 | —18,7 | —22,0 | —22,3 |

Таблица 2б

| Вариант | Раствор, в котором содержится $\text{NaHCO}_3$ | Содержание $\text{NaHCO}_3$ , % |       |       |       |       |
|---------|--|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|         |  | 0                               | 10    | 30    | 50    | 100   |
| а       | Концентрированный и разбавленный . . . .       | —11,6                           | —10,6 | —8,2  | —5,7  | +2,2  |
| б       | Концентрированный . .                          | —11,6                           | —10,3 | —7,6  | —4,1  | +3,6  |
| в       | Разбавленный . . . . .                         | —11,6                           | —11,9 | —12,4 | —12,8 | —15,0 |

вленный раствор содержит  $\text{NaCl}$ , концентрированный —  $\text{NaCl}$  и  $\text{NaHCO}_3$ ; в) разбавленный раствор содержит  $\text{NaCl}$  и  $\text{NaHCO}_3$ , концентрированный —  $\text{NaCl}$ .

Рост содержания  $\text{NaHCO}_3$  в обоих растворах или только в концентрированном приводит к уменьшению отрицательного значения  $K_d$ ; увеличение содержания  $\text{NaHCO}_3$  только в разбавленном растворе вызывает, напротив, рост отрицательного значения  $K_d$ .

III. Разбавленный раствор содержит  $\text{NaCl}$  и  $\text{NaOH}$ , концентрированный —  $\text{NaCl}$  (случай контакта пресного бурового раствора, содержащего добавки щелочи, с пластовой водой).

| Содержание $\text{NaOH}$ в разбавленном растворе, % | 0     | 10    | 20   | 30   |
|---|-------|-------|------|------|
| $K_d$   | —11,6 | —11,2 | —9,7 | —8,9 |

Добавки  $\text{NaOH}$  в разбавленный раствор снижают отрицательное значение  $K_d$ .

## § 2. ДИФФУЗИОННО-АДСОРБЦИОННЫЕ Э. Д. С.

При разделении растворов пористой перегородкой возможно изменение величины и даже знака наблюдаемой диффузионной э. д. с. Гитторф (1902 г.), определяя экспериментально числа переноса ионов, обнаружил, что при разделении растворов тонкими перегородками из животных тканей («мембранами»), числа переноса каждого вида ионов существенно меняются по сравнению со значе-

ниями, наблюдаемыми при отсутствии перегородки. Изменение наблюдаемых контактных э. д. с. по сравнению с диффузионными было впервые отмечено Михаэлисом и Роней (1926 г.) при использовании «мембраны» из коллодия и желатина [82]. Эти данные были получены затем другими исследователями. Было установлено, что наблюдаемые значения э. д. с. с изменением структуры перегородки изменяются от величины диффузионной э. д. с. до предельного значения:

$$E = \frac{RT}{zF} \ln \frac{C_1}{C_2}; \quad (18)$$

для растворов одновалентного электролита

$$E = \frac{RT}{F} \ln \frac{C_1}{C_2}. \quad (19)$$

Последнее равенство после соответствующих подстановок и перехода к десятичному логарифму (при температуре 18° С) приводится к следующему:

$$E = 58 \lg \frac{C_1}{C_2} [\text{мВ}]. \quad (20)$$

Нетрудно показать, что выражения (18), (19) и (20) являются частными случаями равенств (3), (4), если в последних положить  $N_k = 1$ ,  $N_a = 0$ . При этом понятие «числа переноса» обобщается и рассматривается как доля электричества, переносимая данным сортом ионов.

Диффузионные э. д. с., наблюдаемые при разделении растворов перегородкой, или «мембраной», в литературе по физической химии, почвоведению и по отдельным прикладным отраслям науки называются мембранными. В промышленной геофизике В. Н. Дахновым для э. д. с.  $E_{\text{да}}$ , наблюдаемой при контакте растворов в присутствии горных пород, предложен термин «диффузионно-адсорбционная», более точно выражающий физический смысл явления<sup>1</sup>. Этот термин наряду с первым получил распространение в геофизической литературе.

Михаэлис высказал предположение, что отличие величины  $E_{\text{да}}$  от  $E_{\text{д}}$  обусловлено изменением чисел переноса катионов и анионов при диффузии электролита через поры перегородки. Высказывались также другие точки зрения о природе диффузионно-адсорбционных э. д. с. Например, предлагалось рассматривать перегородку как своеобразный растворитель, со свойствами, отличными от воды, в котором изменяются подвижности ионов по сравнению с их значениями в водном растворе [20]. В. Н. Дахновым предложена гипотеза, согласно которой изменение величины и знака диффузионных э. д. с.

<sup>1</sup> По мнению В. Н. Дахнова, термин «мембранный» не применим к горным породам и потому, что диффузионно-адсорбционные потенциалы, изучаемые между растворами при разделении их тонкой перегородкой (мембраной в физическом понятии этого слова) из породы, существенно отличаются от потенциалов, наблюдаемых в природных условиях трехмерных сред.



в горных породах обусловлено преимущественной адсорбцией частицами пород ионов одного знака (обычно анионов), заряжающей поверхность частиц и обеспечивающей повышенную концентрацию ионов противоположного знака в свободном растворе.

И. И. Жуковым обоснована гипотеза о влиянии двойного электрического слоя на изменение чисел переноса в тонких капиллярах, которое приводит к отличию значений  $E_{\text{да}}$  от  $E_{\text{д}}$  [82].

### § 3. ДВОЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СЛОЙ

На границе раздела различных фаз обычно имеется двойной электрический слой. В частности, двойной слой возникает на поверхности твердой частицы при контакте ее с водным раствором электролита (рис. 1, 2).

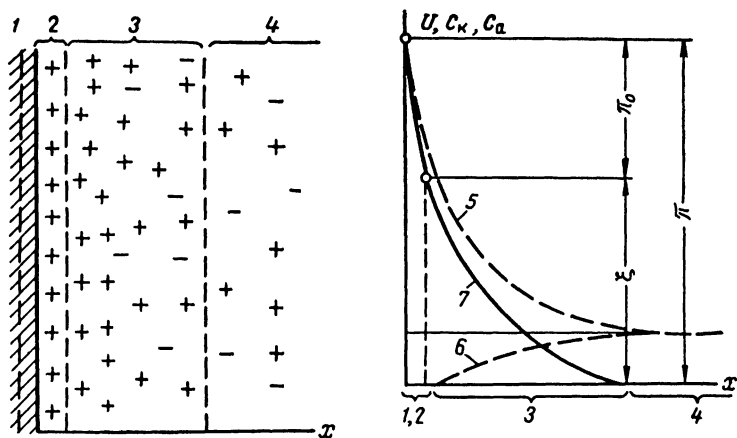


Рис. 1. Схема строения двойного электрического слоя на поверхности твердой фазы в водной среде.

1 — слой Гельмгольца; 2 — слой Штерна; 3 — диффузный слой; 4 — свободный раствор; 5 —  $C_{\kappa} = f(x)$ ; 6 —  $C_a = f(x)$ , 7 —  $U = f(x)$ .

Поверхность твердой фазы обычно несет определенный заряд, поскольку на ней присутствуют «адсорбционные центры», соответствующие ненасыщенным валентностям ионов кристаллической решетки. Для большинства природных объектов, в частности для горных пород, поверхность твердой фазы заряжена отрицательно (примеры: алюмосиликаты, различные формы  $\text{SiO}_2$ , осадочные разности кальцита). Заряженная поверхность твердой фазы составляет внутреннюю обкладку двойного слоя. Она характеризуется поверхностной плотностью заряда, которая для различных объектов по данным [19] составляет от  $3 \cdot 10^{-8}$  до  $7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{мг-экв}}{\text{см}^2}$  и в среднем  $5 \cdot 10^{-8} \frac{\text{мг-экв}}{\text{см}^2}$ ,

чему соответствует  $3 \cdot 10^{13}$  адсорбционных центров в  $1 \text{ см}^2$  поверхности [82]. Внешняя обкладка двойного слоя представлена:

а) слоем адсорбированных ионов противоположного знака — противоионов; обычно этот слой является моноионным, называется он иногда гельмгольцевским;

б) слоем диффузно распределенных в объеме противоионов; эта часть внешней обкладки двойного слоя называется диффузной или просто диффузным слоем. Такое распределение ионов (обычно катионов) во внешней обкладке обусловлено одновременным действием сил электростатического поля заряженной поверхности и молекулярно-кинетического движения в растворе.

Суммарный заряд объема внешней обкладки двойного слоя, имеющего основание  $1 \text{ см}^2$ , равен поверхностной плотности заряда поверхности, поэтому двойной слой в целом является электрически нейтральной системой.

Рассмотрим основные положения теории плоского двойного слоя Гуи — Чэпмена — Штерна. В направлении по нормали к заряженной поверхности в сторону раствора потенциал электрического поля претерпевает скачок  $\pi$ , соответствующий переходу в слой Гельмгольца, а затем скачок  $\pi_0$ , соответствующий выходу из слоя Гельмгольца в диффузный. В диффузной части потенциал убывает в направлении свободного раствора, приближаясь в нем к нулю<sup>1</sup>. Гельмгольцевский слой представлен только катионами, в диффузном слое присутствуют катионы и анионы. Распределение ионов в диффузном слое характеризуется законом Больцмана:

$$C = C_0 e^{\frac{ezU}{KT}}, \quad (21)$$

где  $C_0$  — концентрация катионов и анионов в свободном растворе;  $z$  — валентность иона с учетом знака заряда;  $K$  — постоянная Больцмана;  $C$  — концентрация ионов в точке диффузного слоя с потенциалом  $U$ ;  $e$  — заряд электрона.

В соответствии с (21) концентрация катионов убывает, а концентрация анионов возрастает в направлении от поверхности, приближаясь к концентрации электролита в свободном растворе (рис. 1).

Толщина диффузного слоя (сокращенно — толщина двойного слоя)

$$\delta = \frac{1}{2F} \sqrt{\frac{\varepsilon RT}{\pi C (z_1 + z_2)}} \text{ [см]}. \quad (22)$$

Здесь  $R$ ,  $F$ ,  $T$  — известные величины;  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость в относительных единицах;  $C$  — концентрация свободного раствора в  $\text{моль/см}^3$ ;  $z_1$  и  $z_2$  — валентности ионов. Из формулы (22) следует, что  $\delta$  уменьшается с ростом концентрации раствора при понижении температуры и с переходом к ионам более высокой

<sup>1</sup> Имеется ввиду случай отрицательного заряда поверхности твердой фазы.

валентности. Величина  $\epsilon$ , используемая в формуле (22), существенно отличается от значения  $\epsilon$  в воде, снижаясь до 2—10 [56, 82].

В формуле (22) не учтены реальные размеры ионов, которые приняты во внимание в развитой позднее теории двойного слоя Бикермана [56].

Ионы диффузной части двойного слоя способны перемещаться. Подвижность их зависит от положения иона в обкладке и в среднем в несколько раз меньше подвижности ионов свободного раствора. Подвижность ионов адсорбционного слоя значительно ниже, возможно, они вообще неподвижны [82].

Важной характеристикой двойного слоя является  $\zeta$ -потенциал, который определяется разностью между значениями потенциала в свободном растворе и на границе между подвижной и неподвижной частями двойного слоя (рис. 1). Знак  $\zeta$  соответствует знаку заряда поверхности твердой фазы. При положительной внешней обкладке двойного слоя  $\zeta$ -потенциал будет отрицательным.

В цилиндрическом капилляре структура двойного слоя несколько изменится по сравнению с плоским двойным слоем благодаря электростатическому взаимодействию ионов диффузной обкладки. При этом двойной слой сжимается, величина  $\delta$  будет меньше, чем рассчитанная по формуле (22). Часть ионов диффузной обкладки переходит при этом в адсорбционный слой. Сжатие двойного слоя в щелевидной поре можно оценить по формуле Ленса [82]:

$$\delta = \delta_0 - \frac{h}{2 \left( e^{\frac{h}{2\delta}} - 1 \right)}. \quad (23)$$

Здесь  $h$  — ширина щели;  $\delta_0$  — толщина слоя по Гуи;  $\delta$  — фактическая толщина слоя на поверхности щели.

Формула (23) также не учитывает реальных размеров ионов в диффузном слое.

В тонких капиллярах с радиусом, близким к размерам гидратированных катионов двойного слоя (при  $r < 5$  мкм), толщина двойного слоя, по-видимому, близка к диаметру катионов двойного слоя. В этом случае все ионы внешней обкладки сосредоточены в адсорбционном моноионном слое.

Двойной слой составляет, вероятно, значительную часть объема гидратной пленки на поверхности твердой фазы. По своим физическим свойствам — электропроводности, диэлектрической проницаемости, вязкости и другим — двойной слой в общем случае существенно отличается от свободного раствора. В связи с этим свойства пористых водонасыщенных систем, какими являются, в частности, горные породы, зависят от соотношения в порах объемов, занимаемых свободным раствором и двойным слоем.

Наличие двойного слоя на поверхности твердой фазы является причиной, порождающей в капиллярных пористых системах электрохимическую активность — естественную и вызванную, электро-

кинетические явления — фильтрационные э. д. с. и электроосмос.

Возможны различные способы образования двойного слоя.

1. При контакте твердого вещества с раствором электролита на поверхности твердой фазы происходит частичная диссоциация вещества вследствие гидролиза. Примером является взаимодействие  $\text{SiO}_2$  с водой на поверхности частицы кварца. Молекулы кремниевой кислоты  $\text{H}_2\text{SiO}_3$ , возникающие при этом, диссоциируют на ионы  $\text{HSiO}_3^-$ , которые образуют гельмгольцевский слой, и  $\text{H}^+$ , составляющие внешнюю обкладку двойного слоя. При наличии в растворе других катионов, кроме  $\text{H}^+$ , вещественный состав внешней обкладки

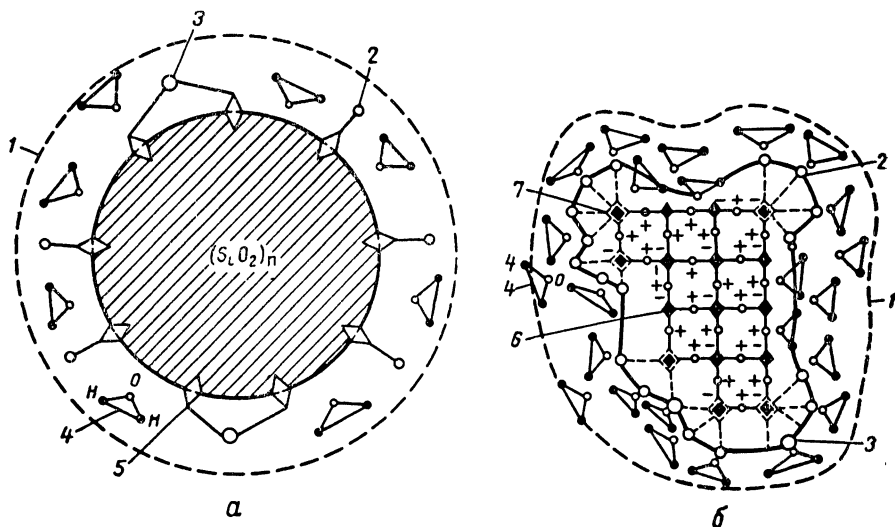


Рис. 2. Схемы мицеллы.

$a$  —  $\text{SiO}_2$ ;  $b$  — глинистого минерала  
1 — границы мицеллы; 2, 3 — обменные одновалентные ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  и др.) и двухвалентные ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  и др.) катионы; 4 — молекулы воды; 5 — анионы  $\text{HSiO}_3^-$  кристаллической решетки  $\text{SiO}_2$ ; 6, 7 — анионы кристаллической решетки алюмосиликата с насыщенными и ненасыщенными связями.

двойного слоя может в последующем измениться за счет частичного замещения катионов  $\text{H}^+$  другими катионами, например  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  (рис. 2,  $a$ ,  $b$ ).

Подобное же происхождение имеет двойной слой на поверхности глинистой мицеллы за счет диссоциации алюмосиликатного скелета (рис. 2,  $b$ ), на поверхности частиц гидроокислов —  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ .

2. При нахождении вещества в растворах, содержащих с ним общие ионы. Так,  $\text{CaCO}_3$  в растворе, содержащем ионы  $\text{Ca}^{++}$ , адсорбирует  $\text{Ca}^{++}$ , что создает положительный заряд поверхности и отрицательный заряд внешней обкладки двойного слоя, состоящий из ионов  $\text{CO}_3^{--}$ . В растворе, содержащем ион  $\text{CO}_3^{--}$ ,  $\text{CaCO}_3$  адсорбирует ион  $\text{CO}_3^{--}$  и приобретает отрицательный заряд. Внешняя.

обкладка двойного слоя в этом случае формируется из ионов  $\text{Ca}^{++}$  и заряжается положительно [23, 24, 82].

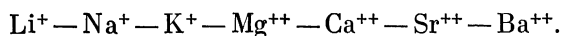
Большая часть осадочных пород — кварцевые пески и песчаники, глины, многие виды известняков и доломитов имеют отрицательный заряд поверхности и диффузный слой, состоящий из катионов.

При отсутствии специфической адсорбции состав катионов двойного слоя определяется законами ионного обмена, в рассматриваемом случае — катионного обмена. Для обмена двух одновалентных ионов:

$$\frac{x_1}{x_2} = k \frac{C_1}{C_2}, \quad (24)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  — содержание ионов в двойном слое;  $C_1$  и  $C_2$  — концентрации их в свободном растворе;  $k$  — константа ионного обмена, зависящая от температуры и pH растворов, природы ионов и адсорбента, на котором происходит обмен. Следовательно, соотношение содержания двух сортов ионов в двойном слое определяется отношением их концентраций в свободном растворе. Обмен ионов разной валентности протекает по более сложным законам [20, 56].

При ионном обмене количества ионов, адсорбируемых из раствора и переходящих в раствор из двойного слоя, эквивалентны, поэтому обе системы остаются электрически нейтральными. В двойном слое изменяется лишь его вещественный состав, но плотность заряда остается неизменной. При прочих постоянных условиях интенсивность адсорбции иона поверхностью ионообменника определяется гидратным радиусом иона и валентностью: чем больше гидратный радиус и ниже валентность, тем менее энергично адсорбируется катион. Поэтому, например, при обменной адсорбции ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Ca}^{++}$  последний более интенсивно будет вытеснять первый из двойного слоя. Катионы элементов первой и второй групп можно расположить в следующий ряд в порядке возрастания интенсивности адсорбции:



Для отдельных ионообменников этот ряд частично видоизменяется [22].

При контакте поверхности с наличием в двойном слое иона  $\text{Na}^+$  с раствором, содержащим катионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{Ca}^{++}$ , возникает ионообменная реакция, которая закончится только после перехода части ионов  $\text{Ca}^{++}$  из раствора в двойной слой в таком количестве, чтобы соотношение ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Ca}^{++}$  в двойном слое и растворе соответствовало уравнению ионного обмена.

#### § 4. ДИФФУЗИОННО-АДСОРБЦИОННАЯ АКТИВНОСТЬ

При разделении пористой перегородкой растворов различной концентрации возникнет диффузия ионов из раствора большей концентрации в раствор меньшей концентрации. В диффузии примут

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 (см. § 1). Если раньше в растворах бинарных одновалентных электролитов числа переноса выражались отношениями

$$N_K = \frac{u}{u+v} \quad \text{и} \quad N_a = \frac{v}{u+v},$$

то в рассматриваемом случае значения  $N_K$  и  $N_a$  для растворов тех же солей при наличии пористой перегородки будут следующими:

$$N_K = \frac{u' n'_K + u n_K}{u' n'_K + u n_K + v n_a},$$

$$N_a = \frac{v n_a}{u' n'_K + u n_K + v n_a}.$$

Здесь  $u'$  — подвижность катионов двойного слоя;  $n'_K$ ,  $n_K$ ,  $n_a$  — доли от общего числа ионов в единице объема капилляров, соответствующие катионам двойного слоя, катионам и анионам свободного раствора<sup>1</sup>.

В капилляре большого сечения, для которого отношение  $\frac{\delta}{r} \ll \ll 1$  ( $r$  — радиус капилляра), двойной слой занимает ничтожную долю объема капилляра, поэтому участие катионов двойного слоя в диффузии практически не меняет значений чисел переноса  $N_K$  и  $N_a$ , характерных для свободной диффузии (рис. 3, а). В капилляре малого сечения при  $\frac{\delta}{r}$ , близком к единице, двойной слой занимает большую часть объема пор, числа переноса  $N_K$  и  $N_a$  существенно меняются благодаря участию в диффузии большого количества катионов диффузного слоя (рис. 3, б). В пределе, когда  $\frac{\delta}{r} = 1$  и капилляр целиком заполнен двойным слоем,  $N_K = 1$ ,  $N_a = 0$ . Для растворов NaCl при  $t = 18^\circ \text{C}$  с уменьшением радиуса капилляров величины  $N_K$  и  $N_a$  изменяются соответственно от 0,4 до единицы и от 0,6 до нуля, для растворов HCl  $0,5 < N_K < 1$ ;  $0,5 > N_a > 0$ .

Изменение чисел переноса по данным [82] наблюдается лишь в капиллярах с  $r < 100 \text{ мк}$ , причем заметное изменение  $N_K$  и  $N_a$  происходит в капиллярах с  $r < 15\text{--}20 \text{ мк}$ . Существенно (на 40% и более) изменяются значения  $N_K$  и  $N_a$  в капиллярах  $r < 2\text{--}3 \text{ мк}$  [82].

<sup>1</sup> При этом предполагается равенство нулю подвижностей анионов, образующих внутреннюю обкладку двойного слоя. (Прим. ред.)

Для растворов одновалентного электролита по аналогии с выражением (3)

$$E_{\text{да}} = 58 (N_{\text{к}} - N_{\text{а}}) \lg \frac{C_1}{C_2}. \quad (25)$$

Если перегородка, разделяющая растворы, содержит только крупные поры, величина  $E_{\text{да}}$  практически не отличается от  $E_{\text{д}}$ ; в этом случае произведение  $58 (N_{\text{к}} - N_{\text{а}}) = K_{\text{д}}$ . Если поры перегородки малы, значения  $N_{\text{к}}$  и  $N_{\text{а}}$  отличны от их значений для свободного раствора и наблюдаемая э. д. с.  $E_{\text{да}}$  не совпадает с величиной

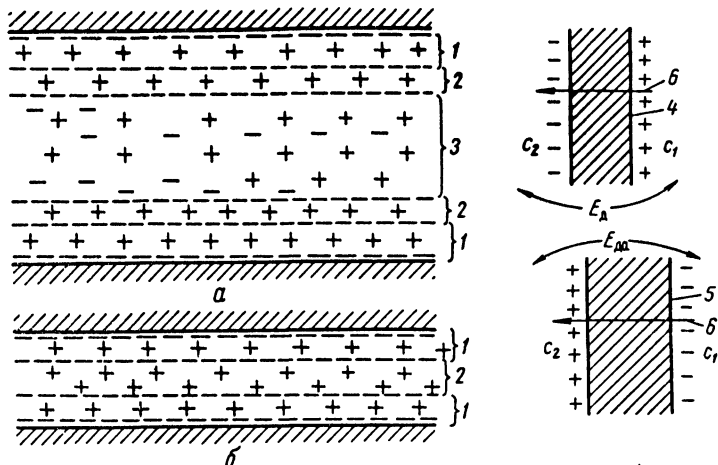


Рис. 3. Схема переноса ионов в широком (а) и узком (б) капиллярах (по И. И. Жукову и О. Н. Григорову).

1 — адсорбированные ионы; 2 — подвижные ионы диффузного слоя; 3 — свободный раствор; 4, 5 — перегородки (мембраны) с широкими и узкими капиллярами, 6 — направление диффузии.

диффузионной э. д. с.  $E_{\text{д}}$ . При разделении растворов перегородкой с очень малыми порами  $N_{\text{к}} = 1$ ,  $N_{\text{а}} = 0$  и величина  $E_{\text{да}}$  определяется выражением (20). Если перегородка заряжена положительно, величина  $E_{\text{да}}$  определяется тем же выражением, только с обратным знаком.

Экспериментальное исследование диффузионно-адсорбционных э. д. с. на образцах горных пород началось в 30-х годах в связи с разработкой и применением в скважинах метода собственных потенциалов. В работах К. Шлюмберже и Е. Леонардона, а затем С. Г. Комарова и Т. М. Шаниной было показано, что основной причиной, порождающей дифференциацию в скважинах кривой собственных потенциалов, являются э. д. с. диффузионного происхождения.

Большая часть экспериментов выполнена с растворами при использовании электрохимической ячейки и схемы, изображенной на рис. 5. Данные лабораторного исследования позволили отметить

следующие основные особенности диффузионно-адсорбционных э. д. с. для этих условий.

1. Кривые  $E_{\text{да}} = f(\lg C_2)$  при  $C_1 = \text{const}$  и  $C_{\text{в}} = \text{const}$  для различных пород, имеющих отрицательный  $\zeta$ -потенциал, заключены в области, ограниченной предельными зависимостями:

$$E_{\text{да}} = 58 \lg \frac{C_1}{C_2}, \quad E_{\text{д}} = -11,6 \lg \frac{C_1}{C_2}$$

или соответственно уравнениям

$$E_{\text{да}} = 58 \lg \frac{Q_2}{Q_1}, \quad E_{\text{д}} = -11,6 \lg \frac{Q_2}{Q_1}.$$

За пределами этой области ниже графика  $E_{\text{д}} = f(\lg C_2)$  находятся только зависимости для пород с положительным  $\zeta$ -потенциалом, редко наблюдающимся в осадочных породах.

2. Зависимости  $E_{\text{да}} = f(\lg C_2)$  и  $E_{\text{да}} = f(\lg Q_2)$  в отличие от предельных графиков нелинейны во всем диапазоне  $C$  или  $Q$ , за исключением области средних разведений. Следовательно, эти графики соответствуют уравнению

$$E_{\text{да}} = K_{\text{да}} \lg \frac{C_1}{C_2} \quad (26)$$

с переменным значением  $K_{\text{да}}$  ( $K_{\text{да}}$  является функцией концентраций  $C_1$  и  $C_2$ ).

3. Основной причиной, вызывающей отличие величины  $E_{\text{да}}$  от  $E_{\text{д}}$ , является наличие в породе высокодисперсного, в первую очередь глинистого, материала с размером частиц менее 1 мк.

Диффузионно-адсорбционной активностью породы называется ее способность вызывать отклонение наблюдаемой э. д. с. концентрационного происхождения  $E_{\text{да}}$  от диффузионной э. д. с.  $E_{\text{д}}$  для той же пары растворов при их непосредственном контакте.

Диффузионно-адсорбционная активность по В. Н. Дахнову и В. Н. Кобрановой [31] рассчитывается по следующей формуле:

$$A_{\text{да}} = \frac{(E'_{\text{да}} - E''_{\text{да}}) - (E'_{\text{д}} - E''_{\text{д}})}{\lg \frac{C'_1}{C'_{1\text{II}}}}, \quad (27)$$

где  $E'_{\text{да}}$  и  $E''_{\text{да}}$ ,  $E'_{\text{д}}$  и  $E''_{\text{д}}$  — соответственно значения диффузионно-адсорбционной и диффузионной э. д. с., измеренные на образце породы растворами  $C'_1$  и  $C_2$ , и  $C''_1$  и  $C_2$  в области линейной связи между  $E_{\text{да}}$  и логарифмом концентрации раствора переменной концентрации. Поскольку область концентраций, для которых эта связь линейна, иногда лежит за пределами диапазона концентраций растворов, с которыми приходится иметь дело в промышленной геофизике, то



наряду с параметром  $A_{\text{да}}$ , определяемым выражением (27), используют также «текущий» параметр  $A_{\text{да}}^*$ :

$$A_{\text{да}}^* = \frac{E_{\text{да}} - E_{\text{д}}}{\lg \frac{C_1}{C_2}}, \quad (28)$$

где  $E_{\text{да}}$  и  $E_{\text{д}}$  — значения соответствующих э. д. с., измеренные с од-

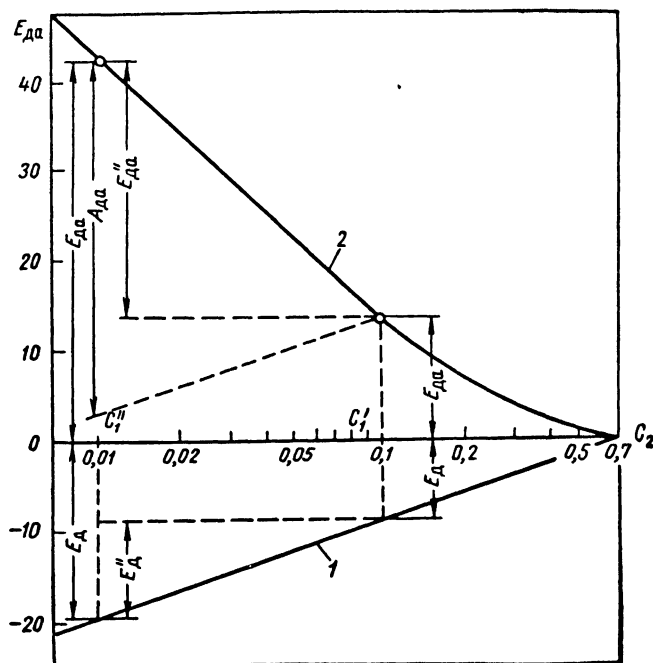


Рис. 4. К определению понятия коэффициента диффузионно-адсорбционной активности  $A_{\text{да}}$  (по В. Н. Дахнову). Растворы NaCl.

1 — график  $E_{\text{д}} = f(\lg C)$ ; 2 — график  $E_{\text{да}} = f(\lg C)$ .

ной и той же парой растворов с концентрациями  $C_1$  и  $C_2$  (рис. 4). Используя приведенные ранее выражения и (28), имеем:

$$A_{\text{да}}^* = K_{\text{да}} - K_{\text{д}}. \quad (29)$$

Это выражение демонстрирует физический смысл диффузионно-адсорбционной активности  $A_{\text{да}}^*$ : ее величина определяется разностью коэффициентов диффузионно-адсорбционной э. д. с. образца и диффузионной э. д. с. для данной пары растворов. Величина  $A_{\text{да}}^*$  является функцией концентрации  $C_1$  и  $C_2$ .

Основным фактором, определяющим диффузионно-адсорбционную активность породы, является ее адсорбционная способность, характеризующаяся в первую очередь приведенной емкостью поглощения  $q_n$  (ионной емкостью породы).

## § 5. ОБМЕННАЯ АДсорбЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ

Приведенная емкость поглощения  $q_n$  среды, однородной по составу,

$$q'_n = Q \frac{1 - K_n}{K_n} \delta_n, \quad (30)$$

где  $Q$  — обменная адсорбционная способность вещества (породы) — количество миллиграмм-эквивалентов определенного катиона, поглощенного 1 г вещества при ионообменной адсорбции<sup>1</sup>;  $\delta_n$  — минералогическая плотность породы;  $k_n$  — коэффициент ее открытой пористости.

Как следует из формулы (30), приведенная емкость поглощения определяется количеством миллиграмм-эквивалентов, поглощенных твердой частью единицы объема породы из единицы объема ее порового пространства.

Параметр  $Q$  характеризует адсорбционную емкость изучаемого вещества [20, 22].

Величина  $Q$  определяет степень дисперсности изучаемой породы и изменяется в зависимости от природы обменивающихся ионов, водородного показателя и температуры окружающей среды. При постоянстве указанных условий  $Q$  можно использовать как параметр, количественно характеризующий породу. Величину  $Q$  можно также представить как произведение плотности заряда двойного слоя  $\sigma$  на полную поверхность  $S_n$  всех частиц в навеске изучаемой породы:  $\sigma$  определяется количеством адсорбционных центров в 1 см<sup>2</sup> поверхности твердой фазы.

Как видно из табл. 3, величина  $Q$ , отражая степень дисперсности породы, тесно связана с ее минеральным составом.

Таблица 3

| Название породы, минерала          | $Q \cdot 10^2, \frac{\text{мг-эке}}{\text{г}}$ |
|------------------------------------|--|
| Каолин . . . . .                   | 4—8  |
| Гидрослюда . . . . .               | 5—25   |
| Монтмориллонитовые глины . . . . . | 20—160   |
| Лимонит . . . . .                  | До 2   |
| Боксит . . . . .                   | До 1   |

<sup>1</sup> В почвоведении для характеристики обменной адсорбционной способности вещества чаще используют величину  $Q_{100}$  — количество миллиграмм-эквивалентов катиона, поглощенного 100 г вещества:  $Q = 0,01 Q_{100}$ .

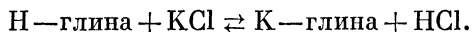
Пропорционально  $Q$  возрастает способность минералов к разбуханию за счет гидратации, особенно в группе монтмориллонитовых и бентонитовых глин, в которых обменная адсорбция и поглощение молекул воды происходят не только на поверхности мицеллы, но и в межпакетном пространстве внутри кристаллической решетки [25].

Общая схема определения  $Q$  состоит из следующих этапов.

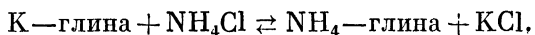
1. Отмывка изучаемого объекта от природных солей, приведение его в порошкообразное состояние без изменения естественной степени дисперсности.

2. Обработка объекта раствором 0,01—0,02 н. соляной кислоты с целью растворения природных карбонатов, вытеснения всех катионов из внешней обкладки двойного слоя и полного насыщения его ионом  $H^+$ .

3. После отмывки от избытка  $HCl$  насыщение объекта заданным катионом с полным вытеснением иона  $H^+$  в раствор. Этого достигают путем многократного воздействия концентрированным раствором электролита, содержащего заданный катион. При избытке катиона, вытесняющего ион  $H^+$ , в свободном растворе в соответствии с законами ионного обмена последний заканчивается полным замещением иона  $H^+$  заданным катионом (например, ионом калия  $K^+$ ) во внешней обкладке двойного слоя:



4. После отмывки от избытка электролита, которым обрабатывался объект для насыщения заданным катионом, производится обработка объекта другим электролитом с целью полного вытеснения поглощенного катиона в раствор:



Вытеснение в раствор катиона, в данном случае  $K^+$ , производится также при создании избытка электролита, обеспечивающего вытеснение.

5. Часть общего количества раствора, содержащего вытесненный катион, берется для анализа, в результате которого объемным или весовым способом устанавливается количество катиона в растворе.

Если порода не содержит карбонатов  $Ca$  и  $Mg$ , анализ проводится по указанной схеме, в качестве обменного катиона используют  $Ca^{++}$ ,  $Ba^{++}$  или катион метиленового голубого [8]. Содержание  $Ca^{++}$  в конце опыта определяют объемным или весовым способом; предпочтительнее объемный трилометрический способ с использованием в качестве индикатора мурексида.  $Ba^{++}$  определяют весовым способом, осаждая в виде  $BaSO_4$ . При адсорбции метиленового голубого последние два этапа опускают. Количество адсорбированного метиленового голубого определяют колориметрически по изменению оптической плотности его раствора, контактирующего с исследуемым объектом [8].

Обменная адсорбционная способность  $Q_{\Pi}$  для  $1 \text{ см}^3$  породы с пористостью  $k_{\Pi}$ , твердая фаза которой представлена однородным дисперсным материалом с емкостью поглощения  $Q$ , рассчитывается по формуле

$$Q_{\Pi} = Q (1 - k_{\Pi}) \delta_{\Pi}. \quad (31)$$

Величина  $Q_{\Pi}$  пропорциональна удельной адсорбционной поверхности  $S_a$  и плотности  $\sigma$  заряда двойного слоя:

$$Q_{\Pi} = \sigma S_a. \quad (32)$$

Определив экспериментально  $Q_{\Pi}$  и зная  $\sigma$  данного вещества, можно рассчитать его удельную поверхность  $S_a$ . Если значение  $S_a$  определено другим способом, то, измерив  $Q_{\Pi}$ , по известным  $Q_{\Pi}$  и  $S_a$  можно вычислить  $\sigma$ .

Сравнение выражений (30) и (31) позволяет прийти к формуле, связывающей  $q_{\Pi}$  и  $Q_{\Pi}$ :

$$q_{\Pi} = \frac{Q_{\Pi}}{k_{\Pi}}. \quad (33)$$

Из последней формулы следует, что параметр  $q_{\Pi}$  определяет концентрацию ионов двойного слоя в объеме пор.

Из выражений (32) и (33) также следует, что

$$q_{\Pi} = \frac{\sigma S_a}{k_{\Pi}}. \quad (34)$$

Следовательно,  $q_{\Pi}$  пропорциональна отношению адсорбционной удельной поверхности породы к ее пористости.

Параметр  $S_a$  возрастает пропорционально обратной величине среднего радиуса частиц. Для обломочных пород величина  $S_a$  изменяется от  $10^2 \text{ см}^{-1}$  (для крупнозернистых песков и песчаников) до  $10^6$ — $10^7 \text{ см}^{-1}$  (для плотных высокодисперсных глин, глинистых сланцев и аргиллитов).

Для пород с  $S_a \leq 10^3 \text{ см}^{-1}$  величина  $S_a$  близка к удельной поверхности  $S_{\Phi}$ , определяемой по формуле Козени — Кармана [82]. Для более дисперсных сред значения параметров  $S_a$  и  $S_{\Phi}$  (последний называется удельной поверхностью каналов фильтрации) все больше различаются и при  $S_a > 10^5 \text{ см}^{-1}$  становятся несопоставимыми, особенно в неоднородных породах, состоящих из смеси крупных зерен и высокодисперсного материала [12].

При изучении зависимости диффузионно-адсорбционной активности от величины  $q_{\Pi}$  последняя может быть изменена одним из следующих способов.

1. Варьированием степени уплотнения породы (изменением  $k_{\Pi}$ ); в этом случае верхний предел определяется тем, до какой степени можно уплотнить имеющимися техническими средствами изучаемую породу.

2. При неизменной пористости использовать вещества с различной величиной  $Q$ . Проще всего изменять  $Q$ , используя объекты

различного минерального состава, имеющие в естественных условиях различную дисперсность. Возможен и другой путь: одно и то же вещество, например кальцит, кварц или каолинит, измельчать до различной степени, что позволит получить среды с разными  $Q$  при неизменном их минеральном составе [22].

Параметр  $q_n$  является мерой дисперсности породы только в определенных условиях. Например, глина или другой высокодисперсный материал почти полностью утрачивает ионообменную способность после прокаливания их при температуре свыше  $500\text{--}600^\circ\text{C}$ . Это может явиться причиной частичной или полной потери электрохимической активности данной породы.

## § 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДИФфуЗИОННО-АДСОРБЦИОННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

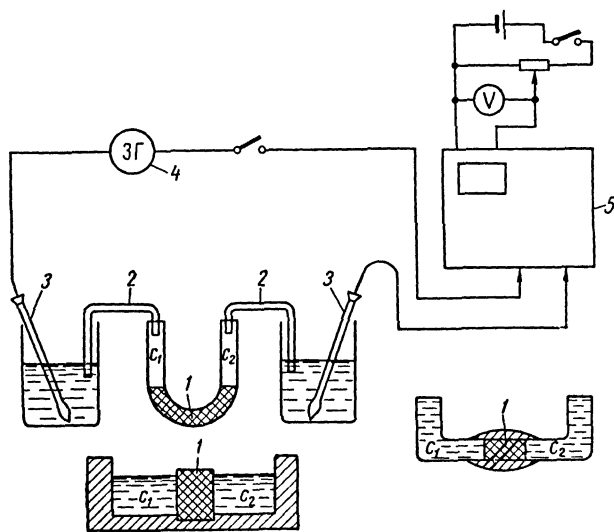
Для измерения диффузионно-адсорбционных э. д. с. в лаборатории используется схема, в которую входят следующие основные элементы: электрохимическая ячейка, измерительные электроды, электролитические контакты, измерительный прибор с дополнительным контуром источника питания (рис. 5).

Электрохимическая ячейка содержит исследуемый образец и растворы, разделенные образцом. Ячейки применяются различной формы и выполненные из разного материала. Для исследования слабо уплотненных образцов наиболее подходит ячейка в виде U-образной трубки, в которой образец получают в виде осадка при центрифугировании суспензии или золя соответствующего материала [12].

Для исследования естественных образцов цилиндрической формы одним из наиболее удачных вариантов ячейки является сочетание двух L-образных трубок и соединительного шланга из резины, плотно одетого на образец и на концы обеих трубок. Конструкция трубок позволяет периодически менять растворы в соответствующих отделениях ячейки, поддерживая постоянными их концентрации [83]. Применяются также ячейки, выполненные из плексигласа, с перегородкой, в которой образец зажимается. Для исследования образцов неправильной формы — сколов — применяют парафиновые ванночки, в которые впаивают образцы [43].

Для измерения э. д. с. диффузионного происхождения обычно используют каломелевые электроды. Потенциал этих электродов стабилен во времени, и разность электродных потенциалов обычно не превышает  $0,1\text{--}0,2\text{ мВ}$ . Электроды помещают в специальные стаканчики, заполненные насыщенным раствором KCl. Стаканчики соединяют с электрохимической ячейкой электролитическими контактами («мостиками»), выполненными в виде трубочек, заполненных агар-агаровой массой, приготовленной на 10%-ном растворе KCl [43].

Иногда используют электроды видоизмененной конструкции, которые помещают непосредственно в соответствующие отделения ячейки; при этом отпадает необходимость в агар-агаровых мостиках [83].

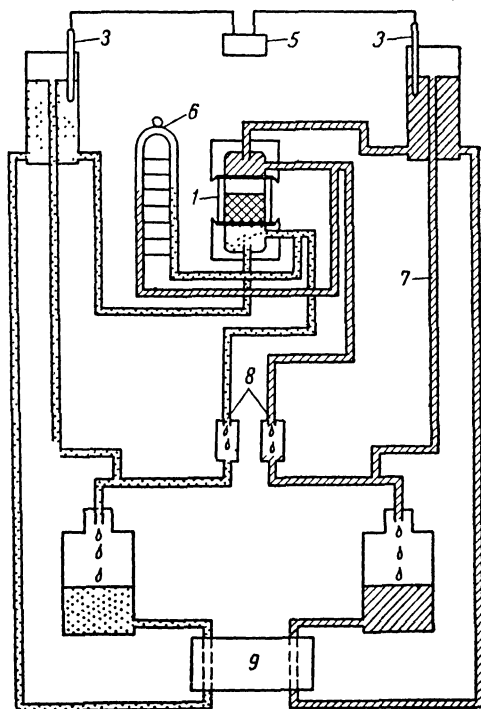


*a*

Рис. 5. Схемы измерения диффузионно-адсорбционных э. д. с.

*a* — обычная схема; *б* — схема, обеспечивающая перемещение границы растворов по образцу в ходе измерения.

1 — электрохимическая ячейка с образцом (различные варианты); 2 — агар-агаровые сифоны; 3 — каломельные электроды; 4 — зеркальный гальванометр; 5 — потенциометр; 6 — манометр; 7 — выдвижная трубка для выравнивания давлений; 8 — краны для регулирования скорости протекания растворов; 9 — насос.



*б*

Измерение э. д. с. производится потенциометром. Момент компенсации отмечается по чувствительному зеркальному гальванометру типа М-17 со специальным осветителем и шкалой. В современных лабораторных схемах измерения э. д. с. диффузионного происхождения обычно используются высокоомные потенциометры постоянного тока типа Р-300 с нормальным элементом Вестона, обеспечивающие высокую точность измерения — до  $\pm 0,01$  мв. При использовании полевого потенциометра типа ЭП-1 напряжение его при помощи регулирующего реостата и точного вольтметра поддерживается постоянным в процессе измерения (рис. 5).

Диффузионные э. д. с. измеряют электрохимической ячейкой, состоящей из двух U-образных стеклянных трубок, соединенных мостиком с ватным тампоном. Разбавленным раствором обычно заполняют соединительный мостик и одну из U-образных трубок, а более концентрированным — другую U-образную трубку [43].

Последовательность измерения диффузионно-адсорбционной э. д. с.

1. В электрохимическую ячейку помещают образец, предварительно отмытый от природных солей и битумов и насыщенный раствором определенной концентрации и химического состава.

2. Немедленно после этого отделения ячейки заполняют растворами, состав и концентрация которых выбирается в зависимости от задачи опыта. Возможны следующие варианты.

а. Исследуется диффузионно-адсорбционная активность пород в чистом виде. В этом случае используется пара стандартных растворов с концентрациями, различающимися в 10 раз и в общем случае отличными от концентрации раствора  $C_b$ , насыщающего образец. Значения  $C_1$  и  $C_2$  берутся обычно в области концентраций  $C < 0,5$  н., например:  $C_1 = 0,4; 0,3; 0,2; 0,1$  н. и  $C_2 = 0,04; 0,03; 0,02; 0,01$  н.

В этом случае опыт обычно проводится в системе  $\text{NaCl} - \text{Na}^+$ , т. е. все три раствора содержат только  $\text{NaCl}$ , образец при подготовке к исследованию насыщен катионом  $\text{Na}^+$ .

При изучении параметра  $A_{\text{да}}$  в растворах других электролитов при сохранении общей схемы опыта вместо растворов  $\text{NaCl}$  используют растворы соответствующего электролита, например,  $\text{CaCl}_2$  или  $\text{MgCl}_2$ , при этом образец предварительно насыщается соответствующим катионом, в данном случае  $\text{Ca}^{++}$  или  $\text{Mg}^{++}$ .

б. Производятся лабораторные определения диффузионно-адсорбционных э. д. с. в условиях, близких к условиям возникновения э. д. с. диффузионного происхождения в скважине. При этом образец насыщается раствором  $\text{NaCl}$  с концентрацией (в г-экв), аналогичной средней концентрации пластовой воды, или раствором, аналогичным пластовой воде. Тем же раствором заполняют одно из отделений ячейки. Другое отделение заполняют раствором  $\text{NaCl}$ , концентрация которого равна средней концентрации фильтрата бурового раствора. При использовании пластовой воды раствор, имитирующий фильтрат, получают разбавлением пластовой воды или ее «модели».

3. После заполнения растворами отделений ячейки измерения э. д. с. производят через каждые 20—30 мин на протяжении от 2—3 ч до суток. Замеры прекращают после получения стабильных значений э. д. с. До каждого измерения величины  $E_{\text{да}}$  и после него измеряют значение  $E_{\text{д}}$  для той же пары растворов и в дальнейшем оперируют с разностью  $E_{\text{да}} - E_{\text{д}}$ , которая свободна от влияния электродной разности потенциалов и скачков потенциала, возникающих на границе мостиков с растворами.

Лабораторные установки с непрерывной регистрацией во времени диффузионно-адсорбционных э. д. с. описаны в работе [38].

Если задачей опыта является не только измерение величины  $E_{\text{да}}$  для заданной пары растворов, но и получение графика  $E_{\text{да}} = f(\lg C)$ , то определяют значение  $E_{\text{да}}$  на одном и том же образце описанным выше способом для нескольких пар растворов, причем раствор более высокой минерализации во всех опытах сохраняется одним и тем же, а концентрация пресного раствора изменяется. После завершения цикла с очередной парой растворов образец помещают в модель пластовой воды и выдерживают в течение времени, достаточного для ликвидации зоны опреснения, возникшей в образце со стороны контакта с пресным раствором.

Для поддержания постоянства концентрации растворов, разделенных образцом, в процессе замера  $E_{\text{да}}$  используются специальные установки [75], позволяющие осуществлять медленное протекание растворов вдоль торцов образца, после того как он заключен в измерительную ячейку (рис. 5). Для того чтобы сохранить резкую границу между растворами, более минерализованный раствор помещают в нижней части установки.

#### § 7. ЗАВИСИМОСТЬ ДИФфуЗИОННО-АДСОРБЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРОВ И ОБМЕННОЙ АДСОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ОБРАЗЦА

Рассмотрим типичный график  $E_{\text{да}} = f(\lg C)$ , полученный при  $C_2 = \text{const}$ ,  $C_{\text{в}} = \text{const}$  и переменном  $C_1$  в пределах от 4 до 0,001 н. в растворах KCl (рис. 6). В области высоких концентраций значение параметра  $A_{\text{да}}$  минимально. В дальнейшем с уменьшением  $C_1$  растет  $A_{\text{да}}$ , достигая некоторого постоянного значения в области  $C_1$  0,05—0,1 н. При очень низких  $C_1$  наблюдается аномальный ход графика и соответствующее уменьшение  $A_{\text{да}}$ , обнаруженное рядом авторов [12, 31].

Возможны различные объяснения этого явления: наиболее вероятной причиной является влияние химической неоднородности электролитов в области очень низких концентраций и прежде всего влияние водородных ионов. Уменьшение  $A_{\text{да}}$  в области очень низких концентраций большого практического значения не имеет, так как последние не типичны для пластовых вод и фильтрата бурового раствора.



По И. Е. Эйdmану коэффициент диффузионно-адсорбционной э. д. с.  $K_{да}$  является функцией средних геометрических концентраций растворов, разделенных образцом [80] (рис. 7).

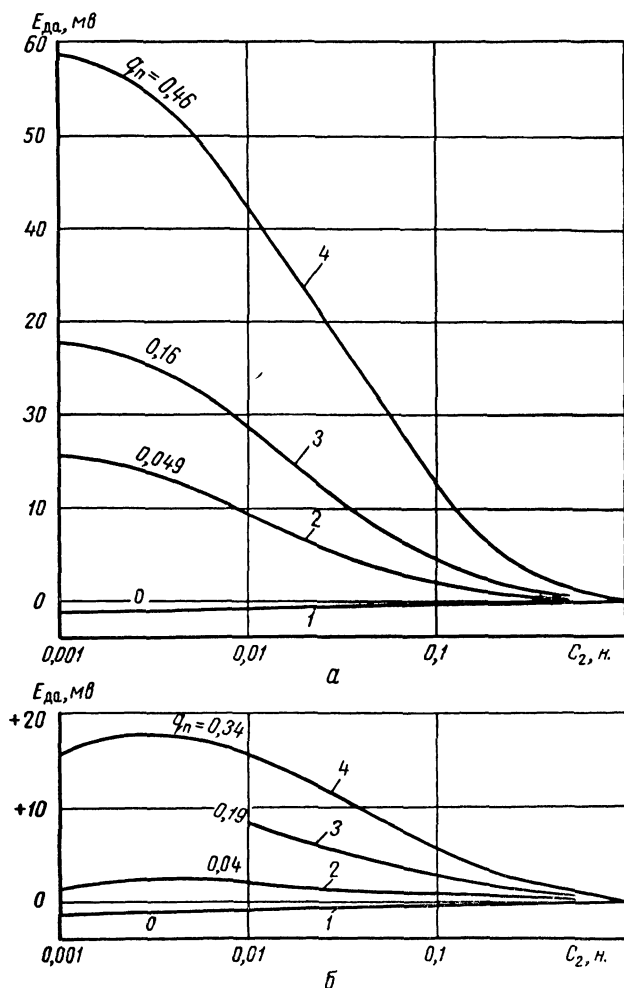


Рис. 6. Зависимости  $E_{да} = f(\lg C_2)$  для искусственных образцов К-глин;  $C_1 = 1 н.$ , растворы KCl.

$a - C_B = 0,01 н.$ ;  $b - C_B = 0,1 н.$  Шифр кривых —  $q_n$ . 1 — график  $E_{д} = f(\lg C_2)$ ; 2 — каолин; 3 — гжельская глина; 4 — кил.

Важным свойством диффузионно-адсорбционных э. д. с. является их аддитивность, установленная экспериментальными [34, 75, 80] и теоретическими [77] исследованиями:

$$E_{да} = E'_{да} + E''_{да}, \quad (35)$$

где  $E'_{\text{да}} = K'_{\text{да}} \lg \frac{C'_1}{C_2}$ ,  $E''_{\text{да}} = K''_{\text{да}} \lg \frac{C''_1}{C_1}$ ,

$$E_{\text{да}} = K_{\text{да}} \lg \frac{C_1}{C_2}, \quad C'_1 < C'_1 < C_2.$$

Ввиду того, что значения  $A_{\text{да}}$  и  $K_{\text{да}}$  непостоянны в диапазоне концентраций, представляющем практический интерес, приводя значения параметров  $A_{\text{да}}$  и  $K_{\text{да}}$ , необходимо оговаривать, какой области концентраций они соответствуют.

Влияние параметров  $C_{\text{в}}$  и  $q_{\text{ц}}$  на величину  $E_{\text{да}}$  наиболее отчетливо видно при исследовании искусственных слабоуплотненных образцов из различных природных материалов. Изучение электрохимических параметров, в том числе и диффузионно-адсорбционной активности, на таких образцах имеет следующие преимущества:

1) приготовление большого числа образцов, одинаковых по вещественному составу, пористости и другим признакам, и их исследование не требуют длительного времени; при работе с естественными образцами это время значительно возрастает, поскольку различные опыты приходится производить один после другого, не говоря уже о промежуточных операциях по подготовке образца к очередному опыту;

2) для искусственных образцов можно изменять в широких пределах их физико-химические свойства — обменную адсорбционную способность, пористость, состав и минерализацию воды, насыщающей образец. Кроме того, можно готовить образцы с заданными свойствами, например, насыщенные определенным катионом, образцы с определенными значениями  $q_{\text{ц}}$ ,  $k_{\text{ц}}$  и т. п., что облегчает задачу изучения природы явления. Однако на искусственных образцах невозможно воспроизвести все особенности природных условий.

Пример изучения диффузионно-адсорбционных потенциалов на искусственных образцах, приготовленных из различных глинистых и других высокодисперсных материалов, описан в работе [12]. Исследуемый материал (природная глина, боксит или маршалит) тщательно отмывался от солей, затем обрабатывался соляной кислотой для растворения карбонатных соединений и вытеснения всех катионов двойного слоя ионом водорода. Полученная H-форма после удаления избытка HCl обрабатывалась последовательными порциями концентрированного раствора электролита, например NaCl, для насыщения катионом данного электролита двойного слоя на поверхности материала. Полученная форма материала, например Na-форма, отмывалась от избытка электролита, после чего готовилась серия суспензий материала на растворах того же электролита различной концентрации. Затем суспензия заливалась в U-образную трубку, центрифугирование которой с заданной скоростью позволяло получить осадок определенной пористости. В полученном образце свободный раствор в порах находился в равновесии с двойным слоем, поскольку в каждой из этих фаз присутствовал один и тот же катион.

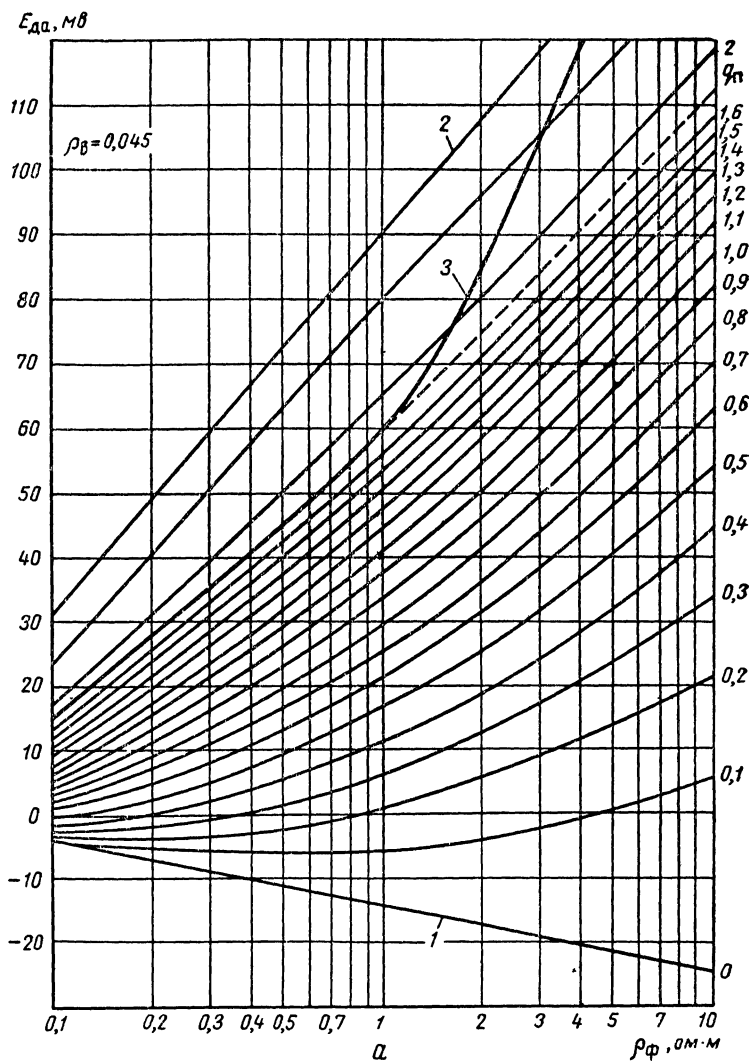
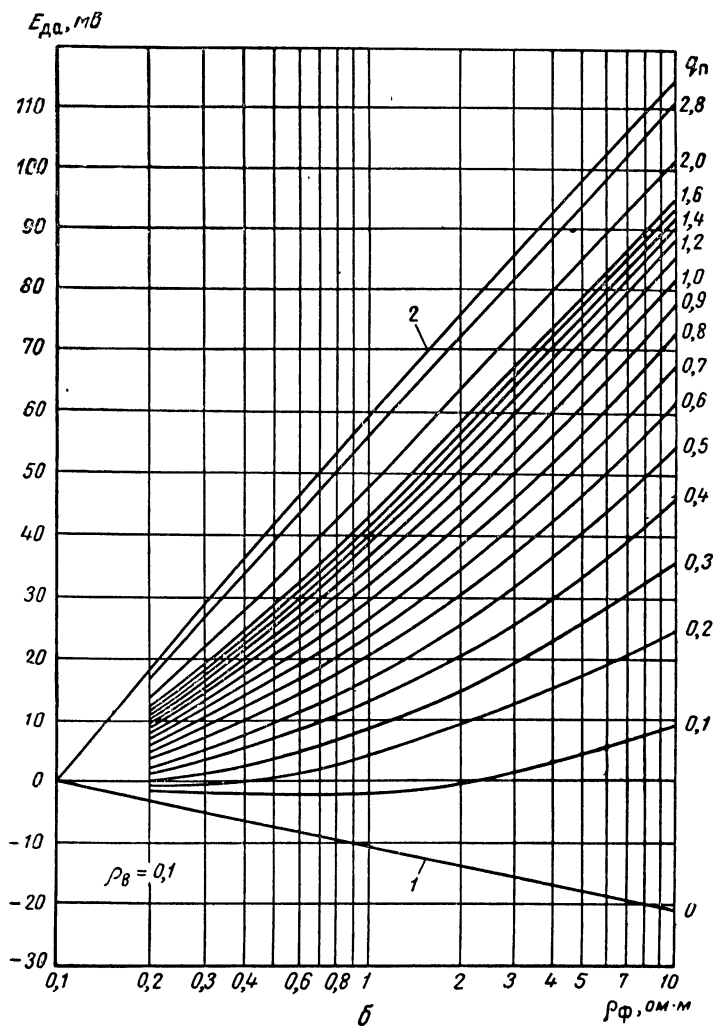


Рис. 7. Усредненные по экспериментальным данным зави  
 $a$  — растворы NaCl,  $q_1 = 0,045 \text{ ом} \cdot \text{м}$ ,  $t = 25^\circ \text{C}$  (по Х. Хиллу и И. Мил  
 $1 - E_d = f(\lg q_2)$ ;  $2 - E_{da} = f(\lg q_2)$  для «идеальной мембраны»;  $3 - E_s =$



симости  $E_d = f(\lg q_2)$  для песчано-глинистых пород.

берну);  $\delta$  — составлено по данным рис. 7, а,  $q_1 = 0,1$  ом·м. Шифр кри-  
в в  $\frac{\text{Мг-сек}}{\text{см}^3}$ .

$f(\lg q_\phi)$ , составленный по данным обработки диаграмм  $U_{\text{СП}}$  [33].

Центрифугирование даже при сравнительно высоких оборотах (до 6000 об/мин) не позволяет получить осадков с пористостью ниже 60% для большинства глин. Для изменения пористости искусственных образцов, однородных по минеральному составу и дисперсности, в более широких пределах используют специальные патроны, в которых образец уплотняют при значительном давлении, что дает возможность доводить его пористость до 20—25% [58].

Последующие операции на искусственных образцах, связанные с измерением э. д. с. диффузионного происхождения, в основном аналогичны изложенным выше.

Большое количество графиков  $E_{\text{да}} = f(\lg C)$ , полученных на искусственных образцах в системах Na-образец — NaCl, K-образец — KCl, Ca-образец —  $\text{CaCl}_2$ , позволяет установить следующее.

1. Общий характер кривых зависимостей  $E_{\text{да}} = f(\lg C)$  тот же, что и в примерах, рассмотренных ранее. Все исследованные материалы (маршалит, каолин, различные глины с преобладанием минералов из группы гидрослюд, а также бентонитовые глины — аскангель, кил, монтмориллонит) при насыщении одно- и двухвалентными катионами имеют отрицательный  $\zeta$ -потенциал, поэтому все графики  $E_{\text{да}} = f(\lg C)$  располагаются выше зависимости  $E_{\text{д}} = f(\lg C)$ .

2. С увеличением параметра  $q$  различие в наблюдаемых значениях  $E_{\text{да}}$  и  $E_{\text{д}}$  при одних и тех же концентрациях  $C$  возрастает. Наименьшая диффузионно-адсорбционная активность характерна для образцов из тонкой фракции маршалита с  $d_3 \approx 1\text{--}3 \text{ мк}$ , наиболее высокая — для образцов из бентонитовых глин (рис. 6, 10).

При одних и тех же значениях  $q$  величины разности  $E_{\text{да}} - E_{\text{д}}$  и  $A_{\text{да}}$  существенно различаются в зависимости от концентрации  $C_{\text{в}}$  раствора, насыщающего образец. С увеличением  $C_{\text{в}}$  величина  $A_{\text{да}}$ , вычисленная для интервала наиболее существенного изменения  $E_{\text{да}} - E_{\text{д}}$  ( $C = 0,01 - 0,1 \text{ н.}$ ), снижается, причем при насыщении слабоуплотненных искусственных образцов раствором с  $C_{\text{в}} = 1 \text{ н.}$  значения  $E_{\text{да}}$  мало отличаются от  $E_{\text{д}}$  даже для образцов с максимальной адсорбционной способностью.

Эти данные подтверждают гипотезу И. И. Жукова о природе диффузионно-адсорбционной активности пористых перегородок. Действительно, изменение чисел переноса  $N_{\text{к}}$  и  $N_{\text{а}}$ , определяющее степень отличия значений  $E_{\text{да}}$  от  $E_{\text{д}}$ , будет возрастать с увеличением параметра  $q$  при фиксированной  $C_{\text{в}}$ , с уменьшением  $C_{\text{в}}$  при фиксированном  $q$ . В поровых каналах, радиус  $r$  которых соизмерим с толщиной  $\delta$  двойного слоя, необходимо учитывать, что свободный раствор с концентрацией  $C_{\text{в}}$  занимает не весь объем пор, а только часть его  $\xi$ , определяемую отношением  $\delta/r$ . В частности, для цилиндрического капилляра

$$\xi = 1 - \left(1 - \frac{\delta}{r}\right)^2.$$

Параметр  $q$  характеризует содержание катионов двойного слоя во всем объеме пор, поэтому с величиной  $q$  надо сравнивать не  $C_{\text{в}}$ , а произведение  $C_{\text{в}}\xi$ .

Таким образом, участие в процессе диффузии катионов двойного слоя и ионов свободного раствора определяется соотношением параметров  $q_n$  и  $C_b \xi$ . Параметр  $\xi$  изучен недостаточно. Количественная оценка его возможна лишь на основании косвенных данных, например, при совместном изучении на одном и том же объекте диффузионно-адсорбционных э. д. с. и удельного электрического сопротивления [13, 80]. Для естественных образцов зависимость  $A_{да}$  от параметра  $q$  для различных фиксированных  $C_b$  характеризуется постепенным выполаживанием с ростом  $q$ . Влияние минерали-

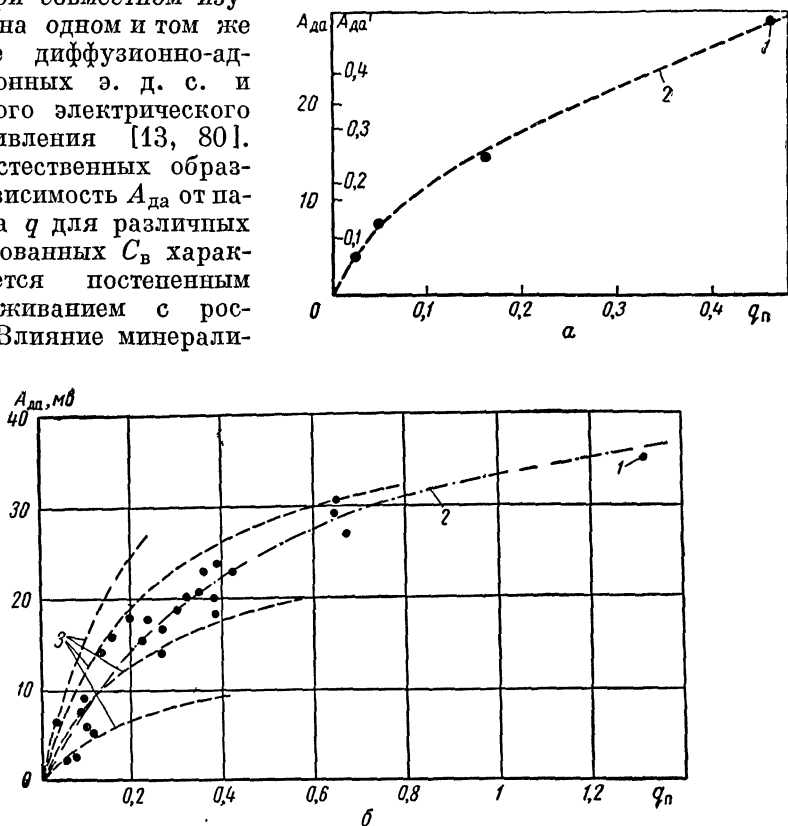


Рис. 8. Экспериментальные зависимости  $A_{да} = f(q)$  и  $A'_{да} = f(q)$ .

$a$  — для искусственных образцов К-глин:  $C_1 = 0,1$  н.,  $C_2 = 0,01$  н.;  $C_b = 0,01$  н., растворы KCl;  $b$  — для образцов песчаников и алевролитов девона Туймазинского месторождения:  $C_1 = 0,4$  н.,  $C_2 = 0,04$  н.,  $C_b = 3,9$  н., растворы NaCl.

— экспериментальные точки; 2 — график корреляционной связи параметров  $A_{да}$  и  $q$ ; 3 — расчетные графики  $A_{да} = f(q)$  для пород с различной адсорбционной активностью глинистого цемента.

зации раствора, насыщающего образец, на величину  $A_{да}$  естественных образцов значительно меньше, но качественно это влияние такое же, что и в случае искусственных слабо уплотненных образцов (рис. 8). Отдельные авторы указывают, что при использовании стабильных значений  $E_{да}$ , полученных по прошествии нескольких суток, а иногда 10—20 дней, не удастся отметить влияния величины  $C_b$  на

величину  $E_{\text{да}}$  или  $A_{\text{да}}$ . Это не противоречит изложенному выше и объясняется кинетикой распределения во времени концентраций растворов в объеме электрохимической ячейки для измерения диффузионно-адсорбционных потенциалов.

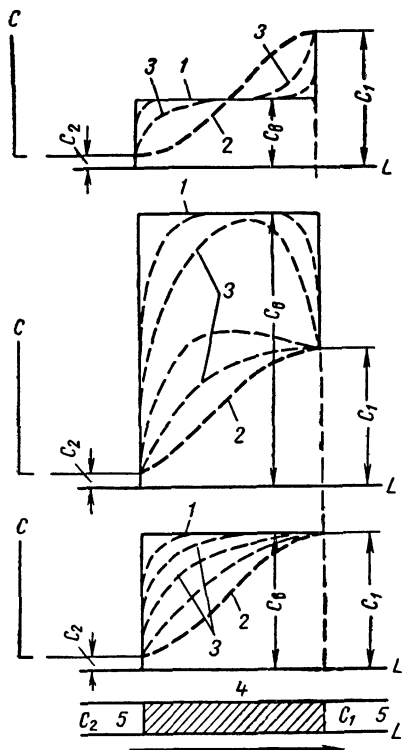


Рис. 9. Гипотетические графики распределения концентрации электролита в порах образца при измерении диффузионно-адсорбционных э. д. с. в случае различных соотношений между  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_{\text{в}}$ .

1 — график  $C_{\text{в}} = f(L)$ , соответствующий началу измерений; 2 — график  $C_{\text{в}} = f(L)$ , соответствующий равновесному распределению концентрации в образце; 3 — промежуточные графики  $C_{\text{в}} = f(L)$ ; 4 — образец; 5 — внешние растворы.

В начальный момент после заполнения отделений ячейки растворами распределение концентраций вдоль ячейки изображается ломаной линией (рис. 9). При соприкосновении внешних растворов с раствором, насыщающим образец, в порах на торцах образца формируется очень тонкий промежуточный слой, образуемый механическим смешением растворов (по Гендерсону), сопровождаемый одновременно возникновением двойного слоя и соответствующего ему скачка потенциала на каждом из торцов. В это время происходит наиболее интенсивное изменение наблюдаемых э. д. с. в течение 5—10 мин после контакта растворов. В последующее время происходит формирование выщелоченной зоны на одном или обоих торцах (если  $C_1 < C_{\text{в}}$ ,  $C_2 < C_{\text{в}}$ ), а в дальнейшем постепенное изменение концентрации вдоль образца в соответствии с законом диффузии и конкретными соотношениями между величинами  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_{\text{в}}$ . В отделениях ячейки концентрация искусственно поддерживается постоянной. По прошествии длительного времени в образце установится такое распределение концентрации, которое будет определяться только значениями  $C_1$  и  $C_2$  и совершенно не будет зависеть от величины  $C_{\text{в}}$  (рис. 9). Естественно, что в процессе становления

распределения концентрации в объеме образца э. д. с. незначительно меняется, а после установления равновесного распределения значение  $E_{\text{да}}$  стабилизируется. Это значение отдельные авторы и рекомендуют использовать как стандартное [51, 81]. Оно действительно не зависит от  $C_{\text{в}}$ , поскольку определяется при условиях, когда независимо от первоначального значения  $C_{\text{в}}$  распределение concentra-

ции и среднее ее значение в объеме образца характеризуется только величинами  $C_1$  и  $C_2$ .

Целесообразнее пользоваться величиной  $E_{\text{да}}$ , которая устанавливается после формирования выщелоченного слоя на торце (или торцах) образца и когда начинается процесс распределения концентрации в соответствии с законом диффузии. В зависимости от адсорбционной способности породы время, необходимое для становления этой э. д. с., составляет от 20—30 мин для чистых, неглинистых песчаников и алевролитов до нескольких часов для плотных глинистых известняков, алевролитов и глин. Величина э. д. с., определяемая при таких условиях, зависит от концентрации  $C_{\text{в}}$ ; условия ее измерения больше соответствуют условиям возникновения э. д. с. диффузионного происхождения в скважине.

### § 8. ЗАВИСИМОСТЬ ДИФФУЗИОННО-АДСОРБЦИОННЫХ Э. Д. С. ОТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЭЛЕКТРОЛИТОВ В РАСТВОРАХ И КАТИОНОВ ДВОЙНОГО СЛОЯ

При положительно заряженной внешней обкладке двойного слоя на поверхности частиц породы нижним пределом величины  $E_{\text{да}}$  является  $E_{\text{д}}$ . Верхний предел  $E_{\text{да}}^{\text{пр}}$ , соответствующий «идеально адсорбирующей породе», зависит от валентности и состава электролитов в растворе, насыщающем образец, и растворах, разделенных образцом. Как уже отмечалось, для одновалентных электролитов

$$E_{\text{да}}^{\text{пр}} \approx 58 \lg \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Выражения для  $E_{\text{да}}^{\text{пр}}$  в растворах двухвалентных электролитов получим, преобразуя формулу (1) § 1. Производя соответствующие подстановки, полагая  $T = 291^\circ \text{K}$  и переходя к десятичному логарифму, имеем:

$$E_{\text{д}} \approx 58 \frac{n_{\text{к}u} - n_{\text{а}v}}{n_{\text{к}z_{\text{к}u}} + n_{\text{а}z_{\text{а}v}}} \lg \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (36)$$

Для растворов двухвалентных электролитов возможны три случая:

1. Катион двухвалентный, анион одновалентный ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{BaCl}_2$ ), при этом  $n_{\text{к}} = 1$ ,  $z_{\text{к}} = 2$ ,  $n_{\text{а}} = 2$ ,  $z_{\text{а}} = 1$ . Подставляя в формулу (36) эти значения и полагая  $v = 0$ , получим:

$$E_{\text{да}}^{\text{пр}} = 29 \lg \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (37)$$

2. Катион одновалентный, анион двухвалентный ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). В этом случае  $n_{\text{к}} = 2$ ,  $z_{\text{к}} = 1$ ,  $n_{\text{а}} = 1$ ,  $z_{\text{а}} = 2$  и при  $v = 0$

$$E_{\text{да}}^{\text{пр}} = 58 \lg \frac{Q_2}{Q_1}.$$



3. Катион и анион — двухвалентные ( $\text{MgSO}_4$ );  $n_k = 1$ ,  $n_a = 1$ ,  $z_a = z_k = 2$ , при  $v = 0$

$$E_{\text{да}}^{\text{пр}} = 29 \lg \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Во втором случае величина  $E_{\text{да}}^{\text{пр}}$  определяется тем же выражением, что и для растворов одновалентных электролитов.

Рассуждая аналогичным образом, нетрудно показать, что в растворах трехвалентных электролитов в зависимости от валентности аниона и катиона значения  $K_d$  также будут различными, изменяясь от 19,3 мв (при  $z_k = 3$ ,  $z_a = 1$ ) до 58 мв (при  $z_k = 1$ ,  $z_a = 3$ ).

$$\text{Графики } E_d = f\left(\lg \frac{C_1}{C_2}\right) \text{ и } E_{\text{да}}^{\text{пр}} = f\left(\lg \frac{C_1}{C_2}\right)$$

ограничивают область возможных значений э. д. с. диффузионного происхождения для данного электролита (рис. 7).

Более сложным является влияние на величину  $E_{\text{да}}$  состава катионов во внешней обкладке двойного слоя. Оно определяется не только валентностью, но и видом катиона. Роль этого фактора исследована на искусственных образцах из природных глин, насыщенных различными катионами. На этих образцах, насыщенных определенным катионом и находящихся в равновесии с раствором соответствующего электролита, определялся  $\zeta$ -потенциал [12] (табл. 4).

Таблица 4

| Катион             | Электролит                 | С, н. | $\zeta$ = потенциал, мв |       |
|--------------------|----------------------------|-------|-------------------------|-------|
|                    |                            |       | каолин                  | кил   |
| $\text{Li}^+$      | $\text{LiCl}$              | 0,1   | —40,8                   | —     |
| $\text{Na}^+$      | $\text{NaCl}$              | 0,1   | —31,2                   | —15,0 |
| $\text{K}^+$       | $\text{KCl}$               | 0,1   | —19,8                   | —9,2  |
| $\text{Mg}^{++}$   | $\text{MgCl}_2$            | 0,1   | —12,2                   | —6,7  |
| $\text{Ca}^{++}$   | $\text{CaCl}_2$            | 0,1   | —9,4                    | —4,2  |
| $\text{Ba}^{++}$   | $\text{BaCl}_2$            | 0,1   | —7,0                    | —3,6  |
| $\text{Fe}^{+++}$  | $\text{FeCl}_3$            | 0,1   | +10,0                   | +1,1  |
| $\text{Th}^{++++}$ | $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$ | 0,1   | +23,3                   | +4,3  |

При насыщении глин одно- и двухвалентными катионами  $\zeta$ -потенциал является отрицательным и уменьшается при переходе от одновалентных к двухвалентным катионам, а внутри каждой из этих групп в направлении от  $\text{Li}^+$  к  $\text{K}^+$  и от  $\text{Mg}^{++}$  к  $\text{Ba}^{++}$ . Уменьшение величины  $\zeta$ -потенциала отражает сжатие двойного слоя за счет уменьшения толщины диффузной обкладки, чему соответствует сокращение доли объема пор, занимаемой двойным слоем, и увеличение доли  $\xi$  свободного раствора в порах. Естественно ожидать уменьшения диффузионно-адсорбционной активности глин при изменении состава катионов в указанном направлении. Это предполо-

жение подтверждается фактическими данными. На рис. 6, 10 приведены графики  $E_{\text{да}} = f(\lg C_2)$  для  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  глин, находящихся в равновесии с растворами соответствующего электролита. Для всех образцов отмечается положительная диффузионно-адсорбционная активность. Чтобы сопоставить величину  $A_{\text{да}}$  диффузионно-адсорбционной активности для одинаковых объектов при насыщении их различными катионами, рассмотрим относительный коэффициент диффузионно-адсорбционной активности, определяемый выражением

$$A'_{\text{да}} = \frac{A_{\text{да}}}{K_{\text{да}}^{\text{пр}} - K_{\text{д}}}, \quad (38)$$

где  $K_{\text{да}}^{\text{пр}}$  и  $K_{\text{д}}$  — значения предельного коэффициента диффузионно-адсорбционной э. д. с. и диффузионной э. д. с. для растворов данного электролита, а  $A_{\text{да}}$  — коэффициент диффузионно-адсорбционной активности образца, рассчитанный по формуле (27).

Сопоставление значений  $A_{\text{да}}$  для Na-, K- и Ca-глин при одинаковом диапазоне концентраций показывает, что наиболее высокой активностью характеризуются Na-глины, более низкой K-глины и еще меньшей Ca-глины при одних и тех же значениях  $q$ .

При изучении естественных образцов с учетом неоднородного состава электролитов в пластовых водах и в фильтрате бурового раствора возникают следующие затруднения.

Состав поглощенных катионов в образце неизвестен<sup>1</sup>. Обычно образец отмывают от природных солей, после чего насыщают его раствором NaCl той же минерализации, что и пластовая вода, или моделью пластовой воды, содержащей основные компоненты, типичные для пластовой воды. При контакте раствора с поверхностью пор между раствором и внешней обкладкой двойного слоя возникнет катионный обмен, который завершится только после того, как соотношение содержания катионов в растворе и в двойном слое придет в соответствие с уравнением ионного обмена. В результате обмена состав ионов в растворе, насыщающем образец, несколько изменится. В образцах с низким содержанием высокодисперсного материала это изменение будет мало и им можно пренебречь, особенно если раствор, насыщающий образец, является минерализованным. Однако в образцах со значительной адсорбционной способностью изменения в составе раствора вследствие ионного обмена могут быть значительными, причем окончательный состав раствора будет неизвестен.

Для того чтобы сделать условия опыта более определенными, можно рекомендовать один из следующих путей.

1. Исследовать все образцы в растворах только одного электролита, например NaCl. В этом случае необходимо предварительно обеспечить полное насыщение внешней обкладки двойного слоя

<sup>1</sup> Известно, правда, что основными компонентами комплекса поглощенных катионов являются  $\text{Na}^+$  и  $\text{Ca}^{++}$  [71].

в образцах катионом  $\text{Na}^+$ , что дает возможность изучить все образцы при стандартных условиях в системе  $\text{NaCl} - \text{Na}$ -образец.

2. Насыщать образцы моделью пластовой воды, предварительно выдерживая их в этом растворе до полного завершения ионного

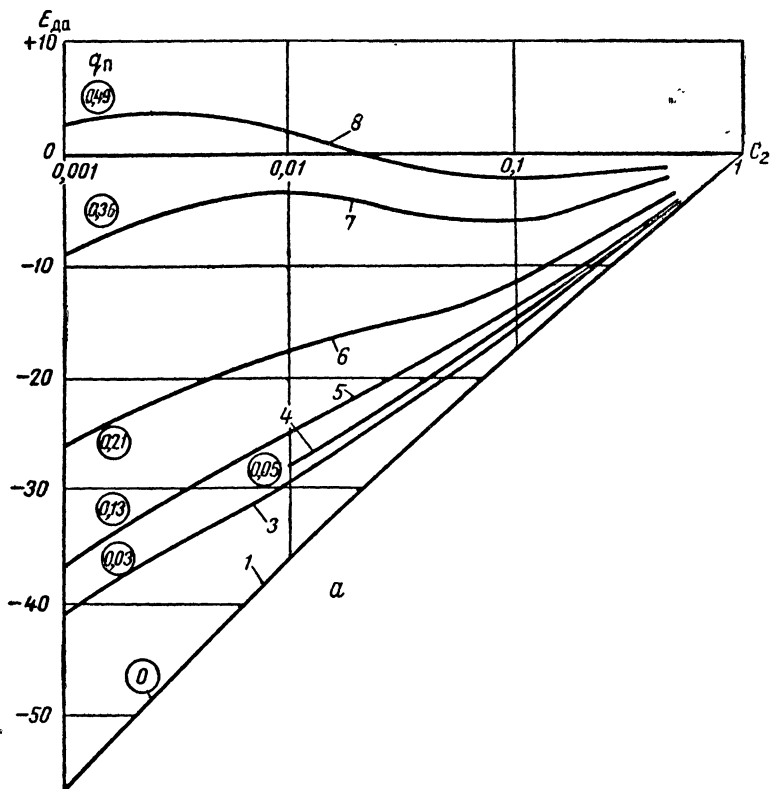


Рис. 10. Зависимости  $E_{\text{да}} = f(\lg C_2)$

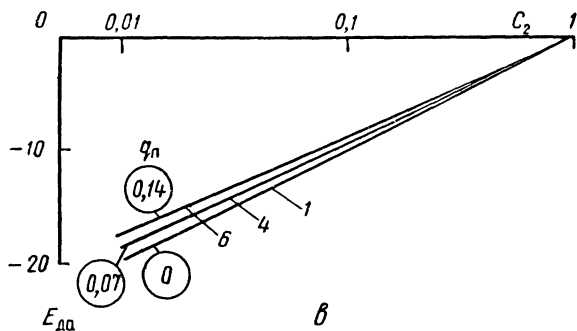
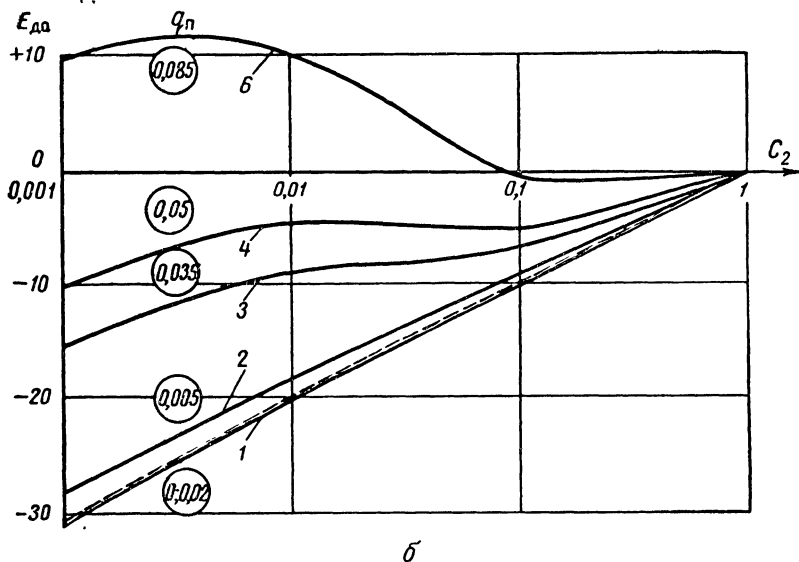
$a$  — Са-глин  $C_1 = 1$  н.,  $\gamma C_B = 0,01$  н., растворы  $\text{CaCl}_2$ ; б, в — Na-глин, рас  $E_{\text{д}} = f(\lg C_2)$ ; 1 — маршалит; 2 — боксит; 3 — уральская огнеупорная аскангель;

обмена, с тем чтобы соотношение катионов в двойном слое соответствовало соотношению их в растворе.

Рассмотрим результаты изучения диффузионно-адсорбционных э. д. с. с растворами сложного состава, полученные различными исследователями для наиболее типичных случаев соотношения солевых компонент в пластовых водах.

### Растворы $\text{NaCl}$ и $\text{CaCl}_2$

Сравнение областей возможных значений  $E_{\text{да}}$  для растворов  $\text{NaCl}$  и  $\text{CaCl}_2$  показывает, что при исследовании одних и тех же объектов в случае растворов  $\text{NaCl}$  следует ожидать более высоких значений



для искусственных образцов.

гворы NaCl,  $C_1 = 1$  н.,  $C_B = 0,01$  н. (б) и  $C_B = 1$  п. (в). Шифр кривых —  $q_n$ . глина; 4 — каолин; 5 — ухтинская зеленая глина; 6 — гжельская глина; 7 — кил.

$E_{да}$ . Это предположение подтверждают экспериментальные данные.

И. Е. Эйрманом проведены измерения  $E_{да}$  на образцах терригенных пород при наличии в растворах, разделенных образцом, и в растворе, насыщающем образец  $CaCl_2$ , наряду с основной компонентой NaCl. Значения  $E_{да}$  определялись при стандартной паре растворов  $c_1 = 0,02$  н.,  $c_2 = 0,2$  н. и насыщении образца раствором промежуточной концентрации, причем для каждого опыта содержание в процент-эквивалентах  $CaCl_2$  во всех трех растворах одинаковое.

По данным [80] с учетом семейства графиков на рис. 7 для данной пары растворов составлены зависимости величины  $A_{да}$  от параметра

$q_{\text{п}}$  при различном процентном содержании  $\text{CaCl}_2$  в растворах (рис. 11, а). Во всем диапазоне изменения  $q_{\text{п}}$  происходит закономерное снижение величины  $A_{\text{да}}$  с увеличением содержания  $\text{CaCl}_2$ . Наибольшее относительное снижение  $A_{\text{да}}$  соответствует средним значениям  $q_{\text{п}}$ . Вначале при добавлении небольших количеств  $\text{CaCl}_2$  в растворы происходит резкое снижение  $A_{\text{да}}$ . Так, для пород с  $q = 0,1-1$  при добавлении 5%  $\text{CaCl}_2$  уменьшение  $A_{\text{да}}$  по сравнению с величиной для чистых растворов  $\text{NaCl}$  составляет от 5 до 20%, а при добавлении 25%  $\text{CaCl}_2$  уменьшение  $A_{\text{да}}$  составляет 10—40%. Последующее увеличение содержания  $\text{CaCl}_2$  в растворах меньше влияет на величину  $A_{\text{да}}$ . При измерении  $A_{\text{да}}$  в растворах, содержащих только  $\text{CaCl}_2$ , максимальное снижение достигает 54%.

Аналогичным образом обработаны данные В. Н. Луговой, которая определяла значения  $E_{\text{да}}$  при несколько измененных условиях:  $\text{CaCl}_2$  добавлялся только в более пресный раствор, минерализованный раствор содержал только  $\text{NaCl}$ , состав и концентрация раствора в образце устанавливалась промежуточной. Использовалась стандартная пара растворов  $C_1 = 0,04 \text{ н.}$ ,  $C_2 = 0,4 \text{ н.}$  (рис. 11, б). Характер зависимостей  $A_{\text{да}} = f(q)$  тот же, что и в рассмотренном выше случае. Степень снижения  $A_{\text{да}}$  при одинаковых процентных содержаниях  $\text{CaCl}_2$  несколько меньше, поскольку  $\text{CaCl}_2$  добавлялся только в один раствор. Однако сопоставление графиков  $A_{\text{да}} = f(q)$  (рис. 11а, б) для аналогичных содержаний  $\text{CaCl}_2$  позволяет утверждать, что основная доля снижения  $A_{\text{да}}$  обусловлена появлением  $\text{CaCl}_2$  в более пресном из двух растворов, разделенных образцом. Следовательно, наличие  $\text{CaCl}_2$  в более минерализованном растворе при отсутствии его в пресном растворе вызовет значительно меньшее снижение  $A_{\text{да}}$  при том же процентном содержании.

Добавка  $\text{MgCl}_2$  в растворы вызовет практически тот же эффект, что и добавки  $\text{CaCl}_2$  [28, 80]. Поэтому при наличии в растворах кроме  $\text{NaCl}$  и  $\text{CaCl}_2$  также и  $\text{MgCl}_2$  можно рассчитать суммарное содержание  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{MgCl}_2$  в процент-эквивалентах, полагая, что вычисленное значение соответствует только электролиту  $\text{CaCl}_2$ .

Общий характер зависимостей  $A_{\text{да}} = f(q)$  при сложном составе электролитов тот же, что и при измерении параметра  $A_{\text{да}}$  в растворах  $\text{NaCl}$ , поэтому можно допустить, что вид графиков  $E_{\text{да}} = f(\lg q_2)$  (рис. 7) для различных  $q_{\text{п}} = \text{const}$  сохраняется, происходит лишь изменение расположения этих графиков. На основании этого предположения с учетом экспериментальных данных составлены семейства графиков  $E_{\text{да}} = f(\lg q_2)$  для растворов, содержащих  $\text{NaCl}$  и  $\text{CaCl}_2$ . Одно из таких семейств для растворов с содержанием 25%  $\text{CaCl}_2$  приведено на рис. 12. С целью сравнения здесь же помещены графики  $E_{\text{да}} = f(\lg q_2)$  для растворов  $\text{NaCl}$ .

Экспериментальные точки, полученные при измерении  $E_{\text{да}}$  на образце глины (девон Ромашкинского месторождения) в растворах  $\text{NaCl}$  с содержанием  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{MgCl}_2$  около 30%-ных эквивалентов, закономерно располагаются вдоль графика  $E_{\text{да}} = f(\lg q_{\text{к}})$  для  $q_{\text{п}} = 1,75$ . Эта величина близка к значению параметра  $q_{\text{п}}$  глин из

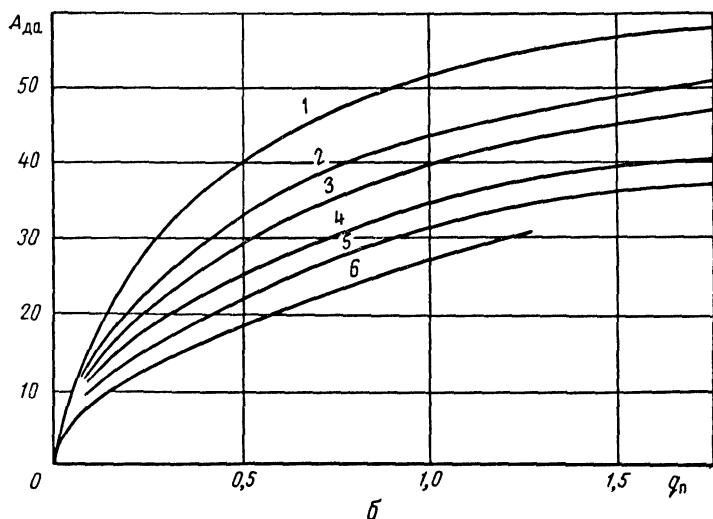
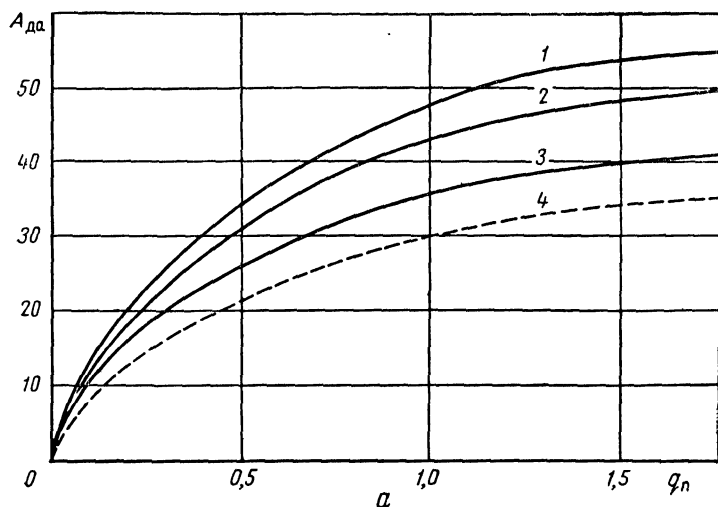


Рис. 11. Зависимости  $A_{да} = f(q)$  для растворов  $\text{NaCl} + \text{CaCl}_2$ . Составлены по данным В. Н. Луговой (а) и И. Е. Эйсмана (б) с учетом графиков, приведенных на рис. 7.

а —  $C_1 = 0,04$  н.,  $C_2 = 0,4$  н. Содержание  $\text{CaCl}_2$  в пресном растворе: 1 — 0%, 2 — 5%, 3 — 25%; в обоих растворах: 4 — 25%; б —  $C_1 = 0,02$  н.,  $C_2 = 0,2$  н. Содержание  $\text{CaCl}_2$  в обоих растворах: 1 — 0%, 2 — 5%, 3 — 10%, 4 — 25%, 5 — 50%, 6 — 100%.

терригенных отложений девона Восточной Татарии и Западной Башкирии.

Следовательно, все известные экспериментальные данные по измерению  $E_{\text{да}}$  в растворах, содержащих, кроме  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{MgCl}_2$  находятся в удовлетворительном соответствии.

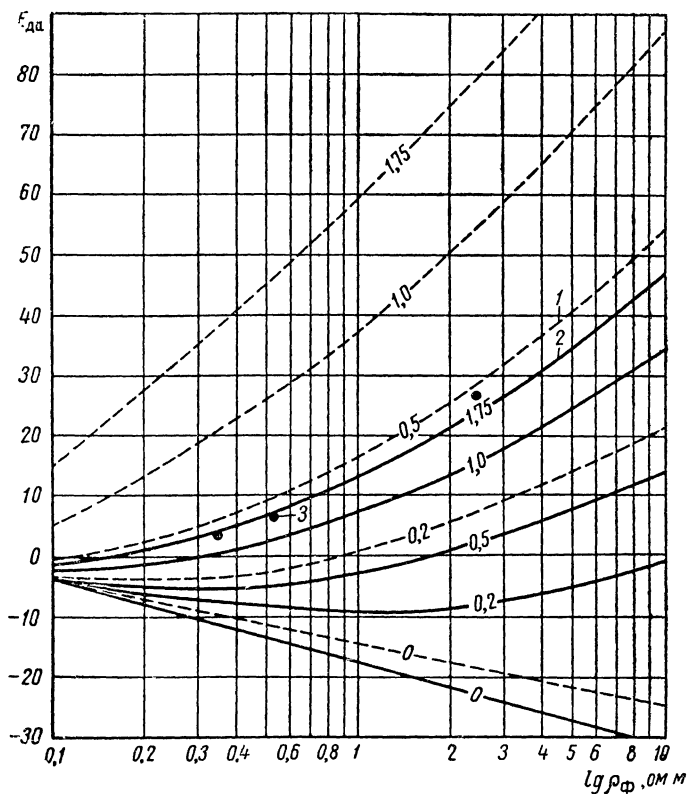


Рис. 12. Зависимости  $E_{\text{да}} = f(\lg \rho_2)$  для песчано-глинистых пород.

Растворы: 1 —  $\text{NaCl}$ , 2 — 75%  $\text{NaCl}$  + 25%  $\text{CaCl}_2$ ; 3 — экспериментальные точки (по В. М. Добрынину) для образца девонской глины в растворах 30%  $\text{CaCl}_2$  + 70%  $\text{NaCl}$ . Шифр кривых —  $a_{\text{П}}$

### Растворы $\text{NaCl}$ и $\text{NaHCO}_3$

Ввиду того что значения  $K_{\text{да}}^{\text{пр}}$  для растворов  $\text{NaCl}$  и  $\text{NaHCO}_3$  одинаковы и составляют 58 мв, а величины  $K_{\text{д}}$  существенно различаются, появление в растворах наряду с  $\text{NaCl}$  электролита  $\text{NaHCO}_3$  вызовет наиболее заметные изменения в величине  $E_{\text{да}}$  для образцов с низкой диффузионно-адсорбционной активностью. Чем выше диффузионно-адсорбционная активность образца, тем меньше будет

влияние  $\text{NaHCO}_3$  при прочих постоянных условиях (рис. 13а).

Подвижность иона  $\text{Na}^+$  больше подвижности иона  $\text{HCO}_3^-$ , поэтому влияние добавок  $\text{NaHCO}_3$  на величину  $E_{\text{да}}$  будет качест-

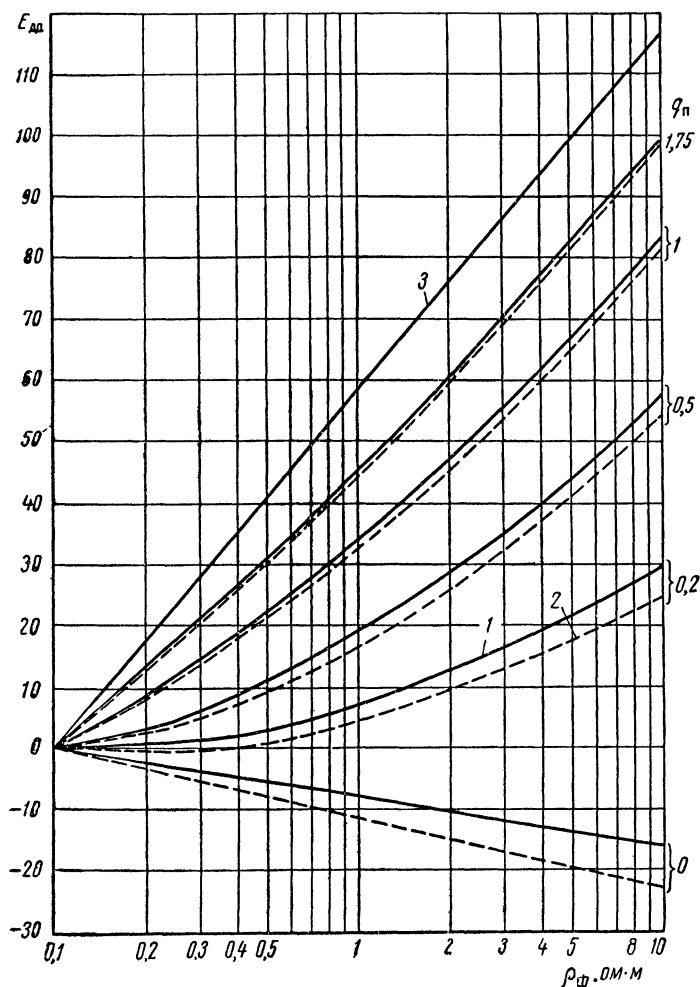


Рис. 13а. Зависимости  $E_{\text{да}} = f(\lg Q_2)$  в растворах 70%  $\text{NaCl}$  + 30%  $\text{NaHCO}_3$  для пород с различными  $q_{\text{п}} = \text{const.}$

Составлены с учетом графиков рис. 7, расчетов по уравнению Гендерсона и экспериментальных данных В. Н. Луговой, В. М. Волковой (Сахалинский геофизический трест). 1 — растворы  $\text{NaCl}$  и  $\text{NaHCO}_3$ ; 2 — растворы  $\text{NaCl}$ ; 3 —  $E_{\text{да}} = f(\lg C_2)$  для идеально-адсорбирующей перегородки. Шифр кривых —  $q_{\text{п}}$ .

венно различным в зависимости от того, в каком из растворов присутствует  $\text{NaHCO}_3$ . Если  $\text{NaHCO}_3$  содержится наряду с  $\text{NaCl}$  в более минерализованном растворе и в образце, а в пресном растворе только



NaCl, наблюдаемые значения  $E_{\text{да}}$  будут выше по сравнению со значениями  $E_{\text{да}}$  для растворов с теми же эквивалентными концентрациями при наличии в них только NaCl.

Сопоставление значений  $K_{\text{да}}$ , определенных для стандартных растворов  $C_1 = 0,04$  н. и  $C_2 = 0,4$  н., в случаях, когда в растворе присутствует только NaCl или когда в более концентрированном растворе наряду с NaCl содержится  $\text{NaHCO}_3$ , указывает на закономерное увеличение наблюдаемой величины  $K_{\text{да}}$  при наличии добавок  $\text{NaHCO}_3$ . Чем больше содержание  $\text{NaHCO}_3$  и чем ниже диффузионно-адсорбционная активность образца, тем существеннее отличие наблюдаемой  $K_{\text{да}}$  от стандартного значения для растворов NaCl. Параметр  $K_{\text{да}}$  образцов с высокой активностью практически не зависит от содержания  $\text{NaHCO}_3$  в соленом растворе. Качественно таким же будет влияние на величину  $E_{\text{да}}$  добавок  $\text{NaHCO}_3$  в оба раствора, разделенные образцом [83].

При наличии  $\text{NaHCO}_3$  только в пресном растворе влияние этого электролита на  $E_{\text{да}}$  будет обратным. В породах с низкой диффузионно-адсорбционной активностью при увеличении содержания  $\text{NaHCO}_3$  параметр  $A_{\text{да}}$  будет уменьшаться по сравнению с  $A_{\text{да}}$  этой же породы в чистых растворах NaCl. В частности, в породе с нулевой активностью при наличии добавки  $\text{NaHCO}_3$  в пресном растворе наблюдаемое отрицательное значение  $E_{\text{да}}$  будет ниже  $E_{\text{д}}$  для пары растворов NaCl.

Изложенное показывает, что изменением величины  $E_{\text{да}}$  породы с высокой диффузионно-адсорбционной активностью из-за присутствия  $\text{NaHCO}_3$  в растворах можно пренебречь. В породах с минимальной и нулевой активностью изменение величины  $E_{\text{да}}$  будет происходить почти по такому же закону, как и величины  $E_{\text{д}}$ , что можно учесть, если произвести расчет по уравнению (15).

## Растворы NaCl и NaOH

Предельное значение  $E_{\text{да}}^{\text{пр}}$  является одинаковым для обоих электролитов, значения диффузионных э. д. с. резко различаются.

Рассмотрим случай наличия NaOH наряду с основной компонентой NaCl в пресном растворе. Остальные варианты, как уже указывалось, практического значения не имеют. Наличие электролита NaOH в пресном растворе приведет к кажущемуся увеличению диффузионно-адсорбционной активности любой породы, причем степень изменения  $E_{\text{да}} - E_{\text{д}}$  будет тем больше, чем ниже активность породы.

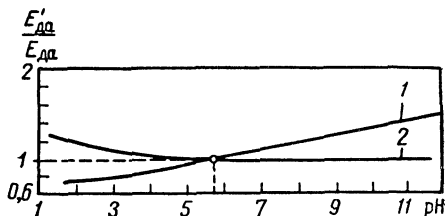
Для пород, характеризующихся значениями  $E_{\text{да}}$ , близкими к предельным, наличие в растворе NaOH практически не будет изменять наблюдаемую диффузионно-адсорбционную активность. Содержание избыточных ионов  $\text{OH}^-$ , присутствующих в растворе при наличии в нем NaOH, обычно принято характеризовать значением pH. Фильтрат глинистого раствора, обработанного щелочным реагентом, имеет pH от 8 до 12. Влияние изменения pH на величину

$E_{\text{да}}$  пород показано на рис. 136. При постоянном повышении pH пресного раствора и уменьшении концентрации в нем NaCl (удельное сопротивление раствора будет расти) влияние избыточных ионов  $\text{OH}^-$  на величину  $E_{\text{да}}$  возрастает.

Рис. 136. Экспериментальные зависимости  $E'_{\text{да}}/E_{\text{да}} = f(\text{pH})$ .

1 — для глин, 2 — для песчаников и известняков.

$E'_{\text{да}}$  и  $E_{\text{да}}$  — э. д. с., измеренные между растворами 70% NaCl + 30% CaCl<sub>2</sub> с концентрацией 4 и 0,04 н. при pH, отличном от pH нейтрального раствора ( $E'_{\text{да}}$ ) и нейтральном pH ( $E_{\text{да}}$ ) (по Е. М. Мирошниченко).



Заметим, что экспериментальное изучение диффузионно-адсорбционных э. д. с. в растворах с повышенным pH затруднено, поскольку благодаря растворению в них  $\text{CO}_2$  и образованию избыточных ионов  $\text{H}^+$  величина pH уменьшается. Стабильные условия измерения  $E_{\text{да}}$  можно создать в этом случае только на установке, полностью изолированной от атмосферы.

### Влияние pH раствора, насыщающего породу

Вследствие диссоциации скелета породы при контакте с водным раствором в последнем появляются избыточные ионы  $\text{H}^+$  или  $\text{OH}^-$ , что приводит соответственно к снижению или увеличению нейтральных значений pH в суспензиях породы или в растворе, насыщающем ее поры. Большая часть осадочных пород (известняки и доломиты, глины и глинистые породы) характеризуется значениями  $\text{pH} > 7$  суспензий [54]. Значения  $\text{pH} < 7$  вероятны лишь для пород, содержащих в рассеянном виде пирит и другие сульфиды, а также насыщенных водой с большим содержанием сероводорода. При насыщении образца породы раствором высокой минерализации влияние pH породы на величину  $E_{\text{да}}$  практически отсутствует. Лишь при насыщении породы водами низкой минерализации влияние pH становится ощутимым (рис. 13в).

Экспериментально влияние pH породы на  $E_{\text{да}}$  исследовано для растворов NaCl. Величина pH в растворе, насыщающем образец, устанавливалась искусственно добавлением в раствор HCl или NaOH. Как и следовало ожидать, при  $\text{pH} < 5,8$  (обычно значение pH нейтрального раствора в равновесии с  $\text{CO}_2$  атмосферы) наблюдается увеличение диффузионно-адсорбционной активности, при  $\text{pH} > 5,8$  — ее снижение.

Диффузионно-адсорбционные э. д. с. при наличии в растворах электролитов  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$  и других типичных для пресных пластовых и грунтовых вод исследовались В. А. Ряполовой [66], В. М. Волковой, В. Н. Луговой. Результаты

этих исследований имеют большое значение для интерпретации диаграмм  $U_{\text{СП}}$  при разведке на водоносные горизонты, залегающие на небольшой глубине. В практике изучения разрезов нефтяных и газовых скважин такие объекты встречаются редко.

Резюмируем изложенное.

1. Основной фактический материал по лабораторному изучению диффузионно-адсорбционных э. д. с. получен с растворами NaCl — главной компонентой пластовых вод и фильтрата бурового раствора.

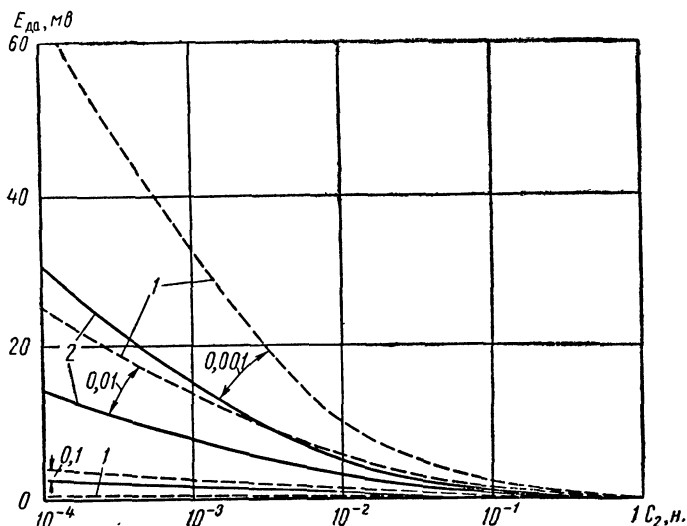


Рис. 13в. Расчетные кривые  $E_{\text{да}} = f(\lg C_2)$  при  $C_1 = 1 \text{ н.}$  для породы с  $q = 0,047$ , растворы KCl.

Шифр кривых — концентрация  $C_{\text{В}}$  раствора в породе,  $C_{\text{ОН}} = 10^{-3}$ . Раствор в породе не содержит ионов  $\text{OH}^-$  (1) и содержит ионы  $\text{OH}^-$  (2).

Он может быть использован как экспериментальная основа для анализа диаграмм  $U_{\text{СП}}$ .

2. Второстепенными компонентами пластовых вод (обычно соленый раствор) чаще всего являются  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{NaHCO}_3$ , а компонентами фильтрата бурового раствора, кроме указанных, также и NaOH. Для учета влияния этих компонент на данные метода  $U_{\text{СП}}$  можно использовать экспериментальные данные по замерам  $E_{\text{да}}$  и  $E_{\text{д}}$  или произвести приближенную оценку расчетным путем. Последнюю можно выполнить по следующей схеме:

а) рассчитать по уравнению Гендерсона график  $E_{\text{д}} = f(\lg C)$  или  $E_{\text{д}} = f(\lg q)$  для заданного состава пресного и соленого растворов;

б) исходя из состава электролитов, определить положение графика  $E_{\text{да}}^{\text{пр}} = f(\lg q)$ . Во всех случаях, имеющих практическое значение,

за исключением присутствия в растворах  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{MgCl}_2$ , этот график описывается уравнением (20);

в) полагая закон изменения  $E_{\text{да}} - E_{\text{д}}$  с изменением  $q$  для каждого фиксированного  $q_{\text{в}}$  или  $C_{\text{в}}$  аналогичным закону изменения этого параметра в соответствии с рис. 7, проводят соответствующую интерполяцию графиков  $E_{\text{да}} = f(\lg C_{\text{в}})$  или  $E_{\text{да}} = f(\lg q_{\text{в}})$  между предельными графиками для различных  $q = \text{const}$ .

Полученные таким образом палетки для разных типичных составов солей в пресном и соленом растворах можно использовать для решения различных задач количественной интерпретации  $U_{\text{сп}}$ .

## § 9. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

Формула (25) дает наглядное представление о процессах, приводящих к возникновению диффузионно-адсорбционных потенциалов, и объясняет причину различия между величинами  $E_{\text{да}}$  и  $E_{\text{д}}$  для одинаковой пары растворов, однако она не описывает характер зависимости величины  $E_{\text{да}}$  от основных факторов, ее определяющих. Разработкой теории диффузионно-адсорбционных э. д. с. занимался ряд авторов, используя различные подходы для решения задачи, однако до настоящего времени не получено строгих уравнений, объясняющих количественно связь диффузионно-адсорбционных э. д. с. со всеми основными аргументами. Это объясняется тем, что на величину  $E_{\text{да}}$  оказывает влияние большое число факторов, при попытке учета которых приходится сталкиваться со значительными математическими трудностями. Кроме того, отдельные вопросы теории диффузионно-адсорбционных потенциалов требуют еще своего экспериментального решения; например, недостаточно изучены свойства ионов в свободном растворе, заполняющем тонкие капилляры, и в двойном слое на поверхности капилляров.

Познакомимся с отдельными подходами к решению задачи.

### Использование уравнений Планка и Гендерсона для описания э. д. с. на границе дисперсной среды и внешнего раствора

Рассмотрим контакт внешнего раствора бинарного одновалентного электролита с концентрацией  $C_1$  и подвижностями ионов  $u$  и  $v$  с раствором, заполняющим поровые каналы породы (рис. 14). В простейшем случае при наличии в свободном растворе одного электролита объем пор содержит две компоненты:

а) электролит свободного раствора с концентрацией в объеме пор  $C_{\text{в}} \xi$  и подвижностями ионов  $u_{\text{в}}$  и  $v_{\text{в}}$ , величина которых в общем случае отлична от величин  $u$  и  $v$  раствора электролита той же концентрации в обычных условиях;

б) электролит двойного слоя с концентрацией ионов в объеме пор  $q$  и подвижностями ионов  $u'$  и  $v'$ .

Для свободного электролита берется концентрация  $C_{\text{в}} \xi$ , поскольку свободный раствор занимает лишь часть  $\xi$  объема пор, и в пере-

счете на весь объем она составит  $C_B \xi$ . Предположение о том, что подвижности ионов  $u_B$  и  $v_B$  отличны от соответствующих значений  $u$  и  $v$ , было высказано в работе [11]; оно возникло при попытке совместного количественного анализа материалов по диффузионно-адсорбционной активности и поверхностной проводимости ряда образцов [13]. Возможными причинами этого явления могут быть электростатическое взаимодействие ионов свободного раствора с двойным слоем и торможение ионов гидратными оболочками на поверхности пор [11, 12].

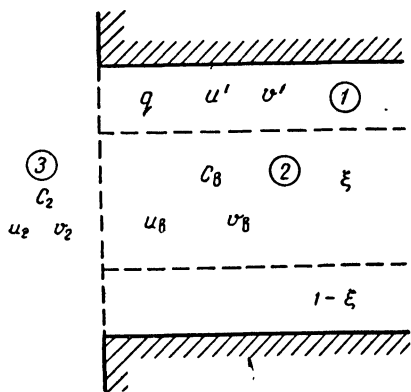


Рис. 14. К выводу уравнений (44), (46) и (47).

Цифры в кружках: 1 — двойной слой; 2 — свободный раствор в порах; 3 — внешний раствор.

Рассматривая частный случай отрицательного заряда поверхности, можно пренебречь наличием в диффузной части двойного слоя анионов и полагать второй компонентой раствора в объеме пор только катионы двойного слоя со средней эффективной подвижностью  $u'$ . По данным различных исследователей  $u'$  составляет от 0,01  $u$  до 0,1  $u$  [56, 82].

Величину э. д. с. диффузионного происхождения, возникающей на границе внешнего раствора и «раствора» со сложным составом в порах, можно вычислить способом Планка или Гендерсона. Подставляя в соответствующие формулы принятые значения отдельных параметров, получим:

а) по Планку — систему уравнений

$$E_{\text{да, гр}} = \frac{RT}{F} \ln \eta, \quad (39)$$

$$\frac{\eta u C_1 - u_B C_B \xi - u' q}{v C_1 - \eta v_B C_B \xi} = \frac{\ln \frac{C_1}{\xi C_B + q} - \ln \eta}{\ln \frac{C_2}{\xi C_B + q} + \ln \eta} \frac{\eta C_1 - \xi C_B - q}{C_1 - \eta (\xi C_B + q)}; \quad (40)$$

б) по Гендерсону

$$E_{\text{да, гр}} = \frac{RT}{F} \frac{(u-v) C_1 - [(u_B - v_B) C_B \xi + u' q]}{(u+v) C_1 - [(u_B + v_B) C_B \xi + u' q]} \ln \frac{(u+v) C_1}{(u_B + v_B) C_B \xi + u' q}. \quad (41)$$

Нетрудно показать, что для неактивной породы при  $q = 0$  и  $\xi = 1$  уравнения (39), (40) и (41) превращаются в обычные уравнения Планка и Гендерсона.

Э. д. с. диффузионного происхождения, возникающую между растворами, разделенными образцом, можно представить как алгебраическую сумму граничных э. д. с., описываемых уравнениями (39), (40) или уравнением (41).

Рассмотрим, насколько возможен подобный подход.

Уравнения Планка и Гендерсона получены в предположении, что катионы и анионы всех электролитов равномерно распределены в объеме каждого раствора. Это условие, справедливое для внешнего раствора, не соблюдается для «раствора» в порах образца, поскольку здесь свободный раствор и двойной слой занимают обособленные объемы.

При выводе уравнений (12), (13) предполагается диффузное распределение каждой из компонент растворов вблизи границы между растворами, при выводе уравнения (15) — наличие промежуточного слоя, в пределах которого концентрация каждого электролита изменяется от нуля до максимального значения  $C$ . Очевидно, электролит двойного слоя не способен диффузно распределяться в пространстве вблизи границы, а также не может механически смешиваться с другими ионами.

Поскольку числовой расчет уравнения (41) проще, чем система уравнений (39) и (40), произведем его анализ.

1. В уравнение (41), кроме постоянных  $R, F$ , входят величины  $q, C_v, C_1$  и  $T$ , известные из условий опыта, величины  $u$  и  $v$  подвижностей ионов во внешнем растворе, соответствующие концентрации  $C_1$ .

Величины  $u_v, v_v, \xi, u'$  в общем случае неизвестны, хотя каждая из них имеет конкретный физический смысл.

Расчеты показывают, что для слабо уплотненных образцов с пористостью более 60% даже при высоких значениях  $q > 0,5$  значения  $u_v$  и  $v_v$  практически не отличаются от подвижностей тех же ионов для концентрации  $C_v$ , указанных в таблицах. В уплотненных образцах с низкой пористостью значения  $u_v$  и  $v_v$  существенно отличаются от соответствующих  $u$  и  $v$ , причем для пород с большими  $q$  величина  $u_v$  становится больше  $v_v$ . Такое изменение соотношения величин  $u_v$  и  $v_v$  объясняется электростатическим взаимодействием диффундирующих ионов свободного раствора с двойным электрическим слоем на поверхности пор породы [11].

Величина  $\xi$  уменьшается с увеличением  $q$ , поскольку чем больше приведенная емкость поглощения, тем меньшая доля объема пор соответствует свободному раствору.

Параметр  $u'$  до настоящего времени изучен слабо. Имеются лишь отдельные противоречивые сведения о нем в работах электрохимиков. Однако не вызывает сомнения, что величина  $u'$  всегда меньше подвижности  $u$  тех же катионов свободного раствора, а также что  $u'$  должно уменьшаться с увеличением минерализации  $C_v$  раствора, насыщающего образец, и особенно с уменьшением радиуса поровых каналов.

Параметры  $u_v, v_v, \xi, u'$  являются функциями  $q$  и  $C_v$ . Значения  $u_v$  и  $v_v$ , характеризующие подвижности ионов в зоне контакта с внешним раствором, зависят также от концентрации внешнего раствора  $C_2$ . Общий вид этих функций неизвестен, поэтому при использовании уравнения (41) основное затруднение заключается в подборе значений  $u_v, v_v, \xi, u'$  для конкретных условий расчета.

2. Подставляя в уравнение (41) значения  $R$ ,  $F$  и  $T = 291^\circ \text{ K}$ , получим:

$$E_{\text{да, гр}} = 58 \frac{(u-v) C_1 - [(u_{\text{в}} - v_{\text{в}}) \xi C_{\text{в}} + u'q]}{(u+v) C_1 - [(u_{\text{в}} + v_{\text{в}}) \xi C_{\text{в}} + u'q]} \lg \frac{(u+v) C_1}{(u_{\text{в}} + v_{\text{в}}) \xi C_{\text{в}} + u'q}. \quad (42)$$

Как уже указывалось, э. д. с. диффузионного происхождения, возникающую между растворами одного и того же электролита с концентрациями  $C_1$  и  $C_2$ , разделенными образцом с емкостью поглощения  $q$ , можно выразить суммой:

$$E_{\text{да, гр}} = 58 \left\{ \frac{(u-v) C_1 - [(u_{\text{в}} - v_{\text{в}}) C_{\text{в}} \xi + u'q]}{(u+v) C_1 - [(u_{\text{в}} + v_{\text{в}}) C_{\text{в}} \xi + u'q]} \lg \frac{(u-v) C_1}{(u_{\text{в}} + v_{\text{в}}) C_{\text{в}} \xi + u'q} + \right. \\ \left. + \frac{(u_{\text{в}} - v_{\text{в}}) \xi C_{\text{в}} + u'q - (u-v) C_2}{(u_{\text{в}} + v_{\text{в}}) \xi C_{\text{в}} + u'q - (u+v) C_2} \lg \frac{(u_{\text{в}} + v_{\text{в}}) \xi C_{\text{в}} + u'q}{(u+v) C_2} \right\}. \quad (43)$$

Рассмотрим предельные случаи.

а. При  $\xi = 1$ ,  $q = 0$  (случай неактивного образца с крупными порами) и значениях  $u_{\text{в}}$  и  $v_{\text{в}}$ , равных соответственно  $u$  и  $v$ ,  $E_{\text{да}}$  определяется формулой Нернста (3).

б. При  $\xi \rightarrow 0$  и  $u'q \gg (u+v) C_1$ ;  $u'q \gg (u+v) C_2$  (случай идеально-адсорбирующей породы, разделяющей растворы низкой концентрации) выражение (43) стремится к предельному выражению<sup>1</sup>

$$E_{\text{да}} = 58 \lg \frac{C_1}{C_2}.$$

В этом втором предельном случае значение  $C_{\text{в}}$  также не влияет на величину  $E_{\text{да}}$ , поскольку весь объем занят двойным слоем. Это подтверждается экспериментами [82].

Следовательно, из уравнения (43) можно получить оба предельных выражения для диффузионно-адсорбционной э. д. с.

3. Полагая в формуле (41)  $C_2 = C_{\text{в}} = C$ , получим выражение для граничной э. д. с.  $E_{\text{да, гр}}$  на контакте образца с внешним раствором при равенстве концентраций растворов:

$$E_{\text{да, гр}} = 58 \frac{(u-v) C - [(u_{\text{в}} - v_{\text{в}}) \xi C + u'q]}{(u+v) C - [(u_{\text{в}} + v_{\text{в}}) \xi C + u'q]} \lg \frac{(u+v) C}{(u+v) \xi C + u'q}. \quad (44)$$

Величина  $E_{\text{да, гр}}$  в этом случае отлична от нуля, что совпадает с выводами авторов [52] и [77]. Непосредственная экспериментальная проверка этого вывода невозможна, однако справедливость его не вызывает сомнений.

4. По уравнению (42) произведены расчеты, позволяющие объяснить основные закономерности связи величины  $E_{\text{да}}$  с параметрами  $C_2$ ,  $C_{\text{в}}$ .

Объектом расчетов выбран фиктивный грунт с пористостью 25,9%. Для заданного диаметра зерен  $d_{\text{з}}$  известными способами рассчитаны средний эффективный радиус  $r_{\text{ср}}$  [82], удельная поверхность  $S_{\text{а}}$ ,

<sup>1</sup> Рассматривается случай одновалентного катиона. (Прим. ред.)

приведенная емкость поглощения (при расчете  $q$  принималось, что  $\sigma = 5 \cdot 10^{-8} \frac{\text{мг-экв}}{\text{см}^2}$ ). Величина  $\xi$  рассчитана с учетом значений  $C_B$  и  $r_{\text{ср}}$ , исходя из упрощающего предположения, что поровые каналы являются цилиндрическими, по формуле

$$\xi = \left(1 - \frac{\delta}{r_{\text{ср}}}\right)^2. \quad (45)$$

Величина  $\delta$  определялась по формуле (22) для заданной концентрации и валентности электролита с учетом сжатия двойного слоя по формуле (23) Ленса, при этом за значение  $r$  принимался средний радиус  $r_{\text{ср}}$ .

Расчетные графики  $E_{\text{да}} = f(\lg C_2)$  для различных  $q = \text{const}$  и  $C_B = \text{const}$ ,  $A_{\text{да}} = f(q)$  для различных  $C_B = \text{const}$ , полученные для растворов KCl (рис. 15), обнаруживают основные свойства соответствующих экспериментальных кривых: нелинейность графиков  $E_{\text{да}} = f(\lg C_2)$  в полулогарифмической системе координат, увеличение диффузионно-адсорбционной активности с увеличением параметра  $q$  и уменьшением величины  $C_B$ .

Графики на рис. 15 получены для одной границы образца с внешним раствором. Кривую  $E_{\text{да}} = f(\lg C_2)$  при  $C_1 = \text{const}$  для соответствующих  $q = \text{const}$  и  $C_B = \text{const}$  можно получить из графика рис. 15 смещением оси абсцисс до пересечения ею соответствующего графика в точке с заданным значением  $C_1$ .

При расчете графиков на рис. 15 принималось, что подвижности ионов в порах образца и во внешнем растворе одинаковы. Расчетный материал, полученный исходя из этого предположения, согласуется с экспериментальными данными для искусственных слабо уплотненных образцов (рис. 6).

Основное различие экспериментальных данных для глинистых образцов с низкой и высокой степенью уплотнения, как уже указывалось, заключается в том, что изменение минерализации воды, насыщающей образец, по-разному влияет на величину  $E_{\text{да}}$ . Если

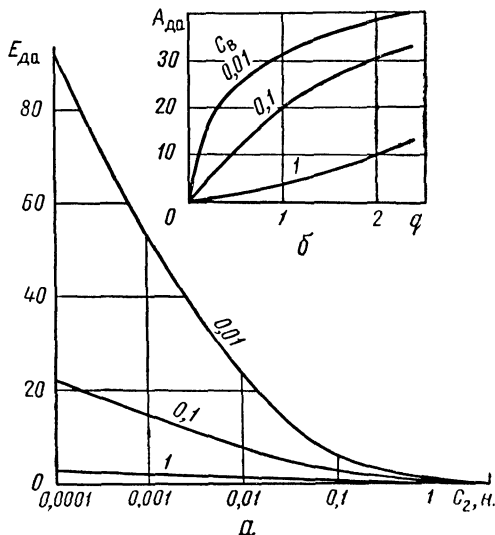


Рис. 15. Графики.

$a - E_{\text{да}} = f(\lg C_2)$ ,  $q = 0,235 \frac{\text{мг-экв}}{\text{см}^2}$ ,  $C_1 = 1$  н.;  
 $b - A_{\text{да}} = f(q)$ ,  $C_1 = 0,1$  н.,  $C_2 = 0,01$  н., рассчитанные по уравнению (44). Растворы KCl.  
 Шифр кривых —  $C_B$ .



в искусственных образцах с высокой пористостью изменение минерализации раствора, насыщающего образец, от 0,01 до 1 н. приводит практически к исчезновению диффузионно-адсорбционной активности, то в естественных образцах глин и глинистых пород изменение минерализации даже в более широких пределах вызывает лишь некоторое уменьшение активности при высокой минерализации. Следствием этого различия является то, что образцы с высокой и низкой пористостью, насыщенные раствором низкой минерализации, при одинаковых значениях параметра  $q$  имеют примерно одну и ту же диффузионно-адсорбционную активность, тогда как при насыщении минерализованными растворами значения параметра  $A_{\text{да}}$  для них будут резко отличаться одно от другого.

В обобщенном виде уравнение (44) можно использовать для учета влияния сложного состава электролитов в растворах на величину  $E_{\text{да}}$ . Для контакта образца, характеризуемого параметрами  $q$  и  $C_{\text{в}}$ , содержащего в свободном растворе  $m$  электролитов, с внешним раствором  $n$  электролитов, величина  $E_{\text{да}}$  определится выражением:

$$E_{\text{да}2} = \frac{RT}{F} \frac{(U_2 - V_2) - [(U_{\text{в}} - V_{\text{в}}) + u'q]}{(U'_2 + V'_2) - [(U'_{\text{в}} + V'_{\text{в}}) + qu']} \ln \frac{U'_2 + V'_2}{U_{\text{в}} + V_{\text{в}} + u'q}. \quad (46)$$

Аналогичное выражение можно составить для контакта образца с другим внешним раствором, имеющим сложный состав:

$$E_{\text{да}1} = \frac{RT}{F} \frac{[(U_{\text{в}} - V_{\text{в}}) + u'q] - (U_1 - V_1)}{[(U'_{\text{в}} + V'_{\text{в}}) + u'q] - (U'_2 + V'_2)} \ln \frac{U_{\text{в}} + V_{\text{в}} + u'q}{U'_1 + V'_1}. \quad (47)$$

В выражениях (46), (47) смысл всех обозначений прежний. Индексы «в», «1», «2» относятся соответственно к раствору, насыщающему поры, и растворам, разделенным образцом. Суммируя величины  $E_{\text{да}1}$  и  $E_{\text{да}2}$ , как и в случае простого состава растворов, получим величину диффузионно-адсорбционной э. д. с. между растворами, разделенными образцом.

Результаты расчетов по уравнениям (46), (47) для различных случаев позволяют выяснить влияние отдельных электролитов на величину диффузионно-адсорбционной э. д. с. Показано, в частности, что одной из причин аномального «хода» экспериментальных кривых  $E_{\text{да}} = f(\lg C_2)$ , установленного В. Н. Дахновым и В. Н. Кобрановой [31] и отмеченного впоследствии рядом других исследователей, в области низких концентраций может быть наличие в растворах избыточных ионов  $\text{H}^+$ , появляющихся в результате растворения в воде  $\text{CO}_2$  воздуха, образования угольной кислоты  $\text{H}_2\text{CO}_3$  и ее последующей диссоциации на ионы  $\text{H}^+$  и  $\text{HCO}_3^-$  (рис. 16). Наиболее существенно влияние иона  $\text{H}^+$  в пресном растворе, поскольку относительное содержание его здесь больше.

Переходим к краткой оценке изложенного подхода.

Применение обобщенных уравнений Планка и Гендерсона позволяет качественно и в известной мере количественно описать зависимость величин  $E_{\text{да}}$  и  $A_{\text{да}}$  от основных факторов, их определяющих.

Вполне удовлетворительно сопоставляются расчеты по этим уравнениям с экспериментальными данными по искусственным слабо уплотненным образцам.

Расчеты для естественных образцов дают положительные результаты только при использовании измененных значений подвижностей ионов  $u_v$  и  $v_v$  свободного раствора в порах породы. Предполагается,

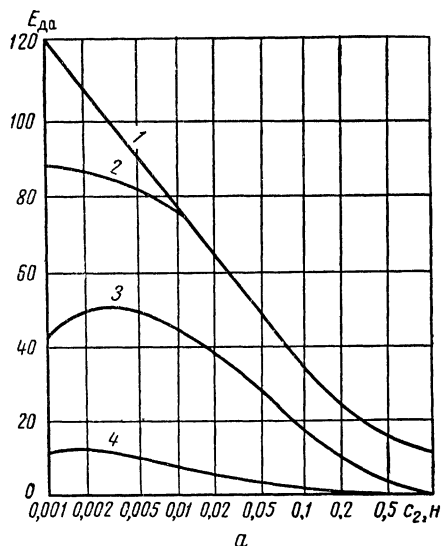
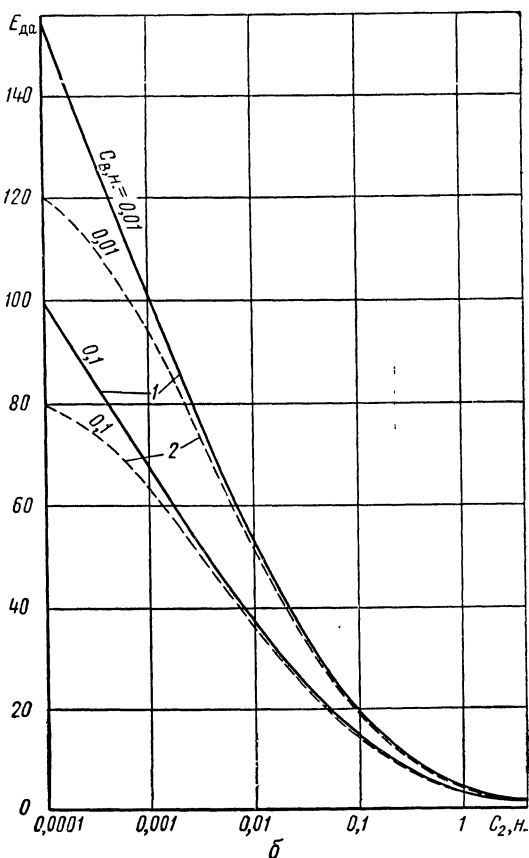


Рис. 16. К вопросу о влиянии pH растворов на величину  $E_{да}$  в области низких концентраций.

$a$  — экспериментальные графики  $E_{да} = f(\lg C_2)$  (по В. Н. Дахнову и В. Н. Кобрановой): 1 — глинистый сланец; 2 — глина ПК; 3 — кил; 4 — песчаник. Растворы KCl. б — расчетные графики  $E_{да} = f(\lg C_2)$  для растворов KCl,  $C_1 = 4$  н. Шифр кривых —  $C_v$ ,  $q = 2,35$ ; 1 — растворы KCl; 2 — растворы KCl + HCl ( $C_{HCl} = 10^{-4}$  н.).



что изменение абсолютных значений  $u_v$  и  $v_v$ , а также соотношения этих значений происходит благодаря одновременному действию на ионы сил осмотического давления, обусловленных разностью концентраций, и электростатических сил взаимодействия ионов с двойным слоем на поверхности частиц породы [11].

Для практических целей удобнее использовать уравнения (46), (47), так как расчеты по ним достаточно просты даже при сложном составе электролитов.

Уравнения (46), (47) не являются строгими. Они пригодны для описания диффузионно-адсорбционных э. д. с. при определенных

фиксированных значениях части параметров, входящих в уравнения. Недостатком их является также невозможность использования для описания изменения диффузионно-адсорбционных э. д. с. во времени. Очевидно, уравнения (46), (47) отражают величину диффузионно-адсорбционной э. д. с., которая устанавливается вначале, после контакта образца с внешними растворами.

### Использование условия равновесия Доппана и уравнения Планка для описания диффузионно-адсорбционной э. д. с. на образце

Другой подход, предложенный в 1935 г. и развитый в последующие годы (1951—1953 гг.) шведским биохимиком Теореллом [92, 93], заключается в следующем. Два раствора со сложным составом одновалентных электролитов разделены перегородкой, имеющей фиксированный электрический заряд (рис. 17). Поры перегородки

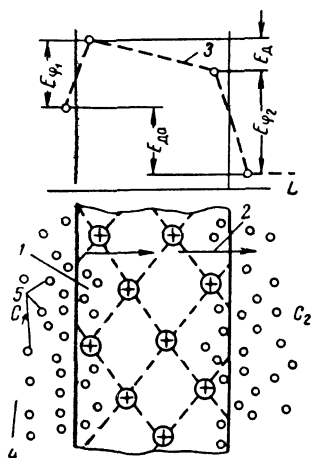


Рис. 17. К выводу уравнения (59).

1 — электрохимически активная перегородка; 2 — направление диффузии; 3 — график изменения потенциала диффузионного происхождения; 4 — внешние растворы; 5 — диффундирующие ионы.

однородны по всему ее объему и пропускают все виды ионов, содержащихся во внешних растворах. Между растворами 1 и 2 возникает диффузия электролитов. После того как процесс диффузии установился, между растворами возникает и сохраняется постоянная разность потенциалов  $E_{да}$ , которая является алгебраической суммой граничных фазовых потенциалов  $E_{φ1}$ , и  $E_{φ2}$  и диффузионной э. д. с.  $E_{д}$ , величина которой искажена влиянием заряда перегородки:

$$E_{да} = E_{φ1} + E_{φ2} + E_{д}. \quad (48)$$

Значения граничных фазовых потенциалов  $E_{φ1}$  и  $E_{φ2}$  определяются выражением:

$$E_{φ} = \frac{RT}{F} \ln r, \quad (49)$$

где

$$r = \sqrt{1 + \left(\frac{q\omega}{2C}\right)^2} - \frac{q\omega}{2C}; \quad (50)$$

$q$  — концентрация фиксированного заряда в порах перегородки (аналог приведенной емкости поглощения);  $\omega = \pm 1$  — множитель перед  $q$ , определяющий знак заряда, для перегородок с положительной внешней обкладкой двойного слоя  $\omega = +1$ ;  $C$  — суммарная концентрация ионов внешнего раствора, контактирующего с перегородкой.

Для границ с растворами 1 и 2 в выражении (50) для  $r$  следует подставить соответственно  $C = C_1$  и  $C = C_2$ , приписав индексы «1» и «2»

величине  $g$ . Суммируя выражения для  $E_{\Phi_1}$  и  $E_{\Phi_2}$ , получим:

$$E_{\Phi} = E_{\Phi_1} + E_{\Phi_2} = \frac{RT}{F} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (51)$$

где 
$$r_1 = \sqrt{1 + \left(\frac{q}{2C_1}\right)^2} - \frac{q}{2C_1}; \quad (52)$$

$$r_2 = \sqrt{1 + \left(\frac{q}{2C_2}\right)^2} - \frac{q}{2C_2}. \quad (53)$$

Формулы для фазовых граничных потенциалов получены из условия соблюдения на границах перегородки с внешними растворами равновесия Доннана [56]. Нетрудно показать, что при  $\frac{q}{C_1} \rightarrow \infty$  или  $\frac{q}{C_2} \rightarrow \infty$  отношение  $\frac{r_2}{r_1} \rightarrow \frac{C_1}{C_2}$ , а все выражение для  $E_{\Phi}$  — к выражению для потенциала идеально-адсорбирующей перегородки («идеальной мембраны»). Эти условия возникают при  $q \rightarrow \infty$  и  $C_1, C_2 = \text{const}$ , что соответствует очень высокой адсорбционной способности перегородки, или при  $C_1, C_2 \rightarrow 0$  и  $q = \text{const}$ , что соответствует перемещению в область очень низких концентраций внешних растворов. При  $q = 0$ , что соответствует незаряженной, нейтральной перегородке, величины  $E_{\Phi_1}, E_{\Phi_2}$  обращаются в нуль.

Величина третьей компоненты диффузионно-адсорбционной э. д. с. в общем случае диффузии через заряженную перегородку ряда различных одновалентных электролитов из раствора 2 в раствор 1 и из раствора 1 в раствор 2 определяется выражением:

$$E'_d = \frac{RT}{F} Q \ln \bar{K}. \quad (54)$$

Значение  $\bar{K}$  рассчитывают по формулам:  
для катионов

$$\bar{K} = \frac{C_{2K} + 0,5(1+\theta)\omega q}{C_{1K} + 0,5(1+\theta)\omega q}; \quad (55)$$

для анионов

$$\bar{K} = \frac{C_{2a} - 0,5(1-\theta)\omega q}{C_{1a} - 0,5(1-\theta)\omega q}. \quad (56)$$

Величину  $Q$ , зная  $\bar{K}$ , находят, решая уравнение:

$$\frac{\bar{U}_{2\mu} - \bar{U}_1}{\bar{V}_2 - \bar{V}_{1\mu}} = \frac{C_{2K}\mu - a_{1K}}{C_{2a} - \mu a_{1a}} \frac{\ln \bar{K} - \ln \mu}{\ln \bar{K} + \ln \mu}, \quad (57)$$

где  $\mu = K^Q$ ;  $a, Q$  и  $\bar{K}$  — неизвестные, их находят, решая систему уравнений (55);  $C_{1K}, C_{2K}, C_{1a}, C_{2a}$  — суммарные концентрации катионов и анионов в растворах 1 и 2; смысл обозначений  $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{V}_1, \bar{V}_2$  — прежний.

Уравнение (54) в сочетании с системой (55), (56) является обобщенным уравнением Планка для э. д. с. установившейся диффузии через заряженную перегородку.

Если растворы 1 и 2 являются растворами одной и той же соли различной концентрации  $C_1$  и  $C_2$ , для  $E'_d$  получаем простое выражение

$$E'_d = \frac{RT}{F} \frac{u-v}{u+v} \ln \frac{C_1 \left( r_1 u + \frac{v}{r_1} \right)}{C_2 \left( r_2 u + \frac{v}{r_2} \right)}. \quad (58)$$

Выражение (58) превращается в уравнение (2) для диффузионной э. д. с. непосредственного контакта электролитов при  $r_1 = r_2 = 1$ , чему соответствует  $q = 0$ , т. е. случай нейтральной перегородки.

Для идеально-адсорбирующей перегородки, как показано выше,  $\frac{r_1}{r_2} = \frac{C_2}{C_1}$  и диффузионная компонента  $E_d$  становится равной нулю.

Суммируя выражения (54) и (58), получим:

$$E_{da} = \frac{RT}{F} \left[ \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{u-v}{u+v} \ln \frac{r_1 u + \frac{v}{r_1}}{r_2 u + \frac{v}{r_2}} \right]. \quad (59)$$

Анализ уравнения (59) показывает:

1. При неограниченном росте  $q$  или убывании  $C_1$ ,  $C_2$  выражение (59) стремится к э. д. с. идеально-адсорбирующей перегородки:

$$E_{da} = \frac{RT}{F} \ln \frac{C_2}{C_1}. \quad (60)$$

2. Для нейтральной перегородки, что практически соответствует также перегородке с крупными порами,  $q_{п} = 0$  и выражение (59) обращается в формулу Нернста для диффузионной э. д. с.

3. Подставляя известные значения  $R$ ,  $F$  и  $T = 291^\circ \text{K}$  в (59) и переходя к десятичному логарифму, получим:

$$E_{da} = 58 \left[ \lg \frac{r_2}{r_1} + \frac{u-v}{u+v} \lg \frac{C_1 \left( r_1 u + \frac{v}{r_1} \right)}{C_2 \left( r_2 u + \frac{v}{r_2} \right)} \right]. \quad (61)$$

Расчетные графики  $E_{da} = f(\lg q_2)$  при  $q_1 = \text{const}$  для различных  $q = \text{const}$  качественно дают картину, аналогичную семейству кривых рис. 7, однако для низких и средних значений  $q$  расчетные графики в области  $q_v > 1 \text{ ом} \cdot \text{м}$  расположены выше соответствующих экспериментальных (рис. 18).

Совпадение частных случаев уравнения (61) с известными из теории выражениями для предельных случаев и качественное соответствие характера расчетных и экспериментальных графиков позволяют сделать вывод о возможности такого подхода к разработке теории диффузионно-адсорбционных э. д. с.

Особенностью выражений (51), (58)—(61) является отсутствие в них до сих пор не определяемых параметров, характеризующих состояние электролита свободного раствора в порах перегородки, в первую очередь концентрации этого раствора  $C_v$ .

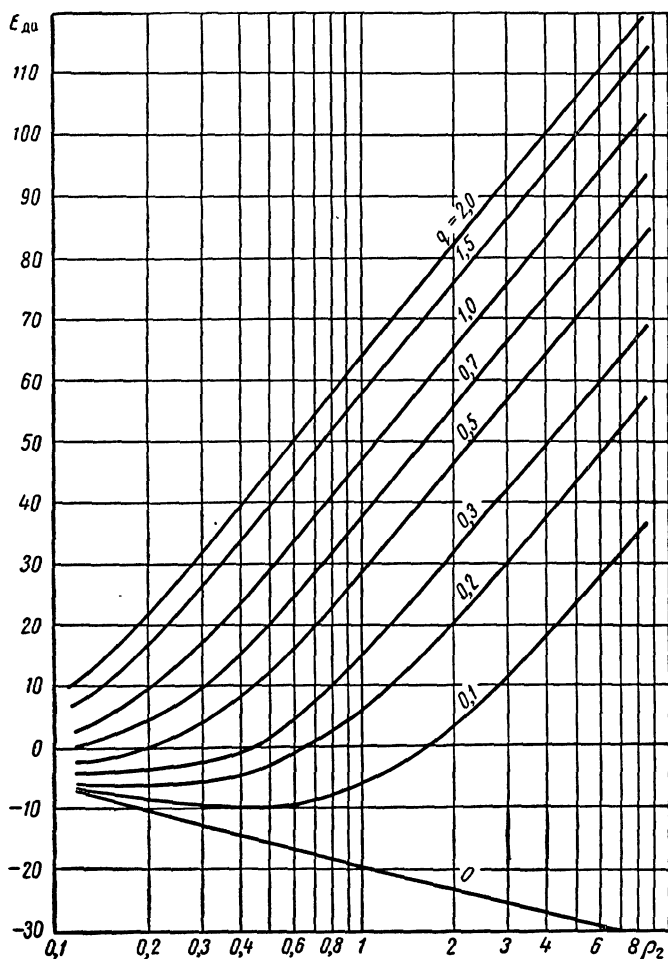


Рис. 18. Графики  $E_{да} = f(\lg \rho_2)$ , рассчитанные по уравнению (59).

Растворы NaCl,  $q_1 = 0,045$  ом·м,  $t = 25^\circ \text{C}$ . Шифр кривых —  $q_{II}$ .

Значения  $E_{да}$ , вычисленные по уравнению (61), по-видимому, близки к величине диффузионно-адсорбционной э. д. с., наблюдаемой по прошествии продолжительного времени (от нескольких часов до нескольких суток) после начала опыта.

Для описания э. д. с. диффузионного происхождения, наблюдаемых до установления равновесного распределения концентрации вдоль образца, а также э. д. с., соответствующих слабо уплотненным образцам, уравнение (59) менее пригодно.

Уравнение (54) в сочетании с выражениями (55), (56) можно использовать для теоретического исследования влияния неоднородного состава одновалентных электролитов на величину диффузионно-адсорбционной э. д. с.

Однако уравнение (61) не может объяснить некоторых свойств диффузионно-адсорбционных э. д. с., например, влияния на величину  $E_{\text{да}}$  значения  $C_{\text{в}}$ . Как и в предыдущем случае, рассматриваемый подход позволяет дать только статическую характеристику диффузионно-адсорбционной э. д. с.

Выражение для  $E_{\text{да}}$ , по структуре подобное уравнению (59), было получено американскими геофизиками Мак-Карделлом и др. [52] в 1953 г. на основе гипотезы избирательной адсорбции анионов поверхностью пор образца, разделяющего растворы электролита. Уравнения для граничных потенциалов в работе [52] тождественны уравнениям (49), (50), в выражении же для диффузионной составляющей допущена неточность.

#### Решение дифференциального уравнения диффузии на границе адсорбирующих сред на основе гипотезы об избирательной адсорбции ионов

Д. А. Шапиро в 1948—1951 гг. обобщил дифференциальное уравнение Нернста на случай диффузии ионов бинарного одновалентного электролита в адсорбирующей среде на основе гипотезы В. Н. Дахнова [76, 77].

В соответствии с [77] диффузионная э. д. с. при наличии адсорбирующей среды при постоянной температуре для растворов бинарного электролита описывается уравнением:

$$dE_{\text{да}} = \frac{RT}{F} \left[ \frac{\mu_{\text{a}}v - \mu_{\text{к}}u}{\mu_{\text{a}}v + \mu_{\text{к}}u} \frac{dC}{C} + \frac{vd\mu_{\text{a}} - ud\mu_{\text{к}}}{\mu_{\text{a}}v + \mu_{\text{к}}u} \right]. \quad (62)$$

Здесь  $\mu_{\text{к}}$  и  $\mu_{\text{а}}$  — доли подвижных катионов и анионов от общего количества соответствующего сорта ионов; значения величин  $C$ ,  $u$ ,  $v$ ,  $R$ ,  $T$ ,  $F$  — прежние. Величины  $\mu_{\text{к}}$  и  $\mu_{\text{а}}$  — функции параметров  $T$ ,  $C$  и удельной поверхности  $S_{\text{а}}$ .

Определяя аналитическое выражение функций  $\mu_{\text{к}}(C, T, S_0)$  и  $\mu_{\text{а}}(C, T, S_0)$ , исходя из законов адсорбции, и интегрируя уравнение (62) по  $C$ , получим зависимость  $E_{\text{да}} = f(\lg C)$ .

Одним из наиболее общих законов адсорбции является уравнение Лэнгмюра [39], принимающее для рассматриваемого случая следующий вид:

для катионов

$$1 - \mu_{\text{к}} = \frac{q_{\text{п}}\mu_{\text{к}}}{\beta_{\text{к}} + \mu_{\text{к}}C}, \quad (63)$$

где  $q_{\pi} = \frac{\sigma S_0}{k_{\pi}}$  — приведенная емкость поглощения, соответствующая предельному насыщению адсорбента;  $\beta_k$  — некоторая постоянная<sup>1</sup>;

для анионов

$$1 - \mu_a = \frac{q_{\pi} \mu_a}{\beta_a + \mu_a C}. \quad (64)$$

Вычислив частные производные от уравнений (63), (64) для  $\mu_k$  и  $\mu_a$  по переменным  $C$ ,  $q_{\pi}$ ,  $\beta_k$ ,  $\beta_a$  и подставив полученные выражения для  $\mu_k$ ,  $\mu_a$  и их производных в уравнение (62), имеем:

$$\begin{aligned} dE_{\text{да}} = & \frac{RT}{T} \left\{ \frac{1}{(C - q_{\pi} - \beta_a + R_a) v + (C - q_{\pi} - \beta_k + R_k) u} \times \right. \\ & \times \left[ \left( 1 + \frac{C - q_{\pi} + \beta_a}{R_a} \right) v - \left( 1 + \frac{C - q_{\pi} + \beta_k}{R_k} \right) u \right] dC - \\ & - \left[ \left( 1 + \frac{C - q_{\pi} - \beta_a}{R_a} \right) v - \left( 1 + \frac{C - q_{\pi} - \beta_k}{R_k} \right) u \right] dq_{\pi} - \\ & \left. - \left[ \left( 1 - \frac{C + q_{\pi} + \beta_a}{R_a} \right) v d\beta_a \right] + \left( 1 - \frac{C + q_{\pi} + \beta_k}{R_k} \right) u d\beta_k \right\}, \quad (65) \end{aligned}$$

где  $R_k$  и  $R_a$  — функции величин  $C$ ,  $q_{\pi}$ ,  $\beta_k$ ,  $\beta_a$ .

Полученные в результате графического интегрирования уравнения (65) кривые зависимостей  $E_{\text{да}} = f(\lg C)$  и  $\frac{\partial E_{\text{да}}}{\partial C} = f(\lg C)$  для границы адсорбирующей среды с внешним раствором отражают основные особенности диффузионно-адсорбционных потенциалов и диффузионно-адсорбционной активности, известные по лабораторным данным [77].

На основе анализа уравнения (65) сделан вывод о наличии фазового потенциала на границе адсорбирующей среды и внешнего раствора при равенстве концентраций внешнего раствора и раствора в порах среды; изучено влияние коэффициента водонасыщения пор на диффузионно-адсорбционную активность породы; показана роль выщелоченного слоя на границе породы внешнего раствора в формировании диффузионно-адсорбционной э. д. с.; показано, что диффузионно-адсорбционные э. д. с. как функции концентрации растворов подчиняются закону аддитивности.

В уравнения Д. А. Шапиро входит ряд параметров, недоступных непосредственному экспериментальному определению, что осложняет их практическое применение. Использование данного подхода для получения уравнения диффузионно-адсорбционной э. д. с. при наличии в растворах нескольких электролитов различной валентности привело бы к еще большему усложнению выражений.

Работа [76] явилась первой серьезной научной основой количественной теории диффузионно-адсорбционных э. д. с.

<sup>1</sup> В оригинале работы Д. А. Шапиро [77] приведенная емкость поглощения обозначается через  $\alpha$  и называется «ионная емкость породы».



Теории диффузионно-адсорбционных э. д. с. посвящен ряд исследований других авторов, однако объем настоящей книги не позволяет дать изложение этих работ.

Отметим работу Л. Б. Дворкина, посвященную теоретическому исследованию вопроса о становлении во времени э. д. с. диффузионного происхождения [34]. В ней рассматривается одномерная диффузия вещества (соли) из раствора 2 в раствор 1 через перегородку в направлении нормали к перегородке, разделяющей растворы. Распределение соли в перегородке выражается решением уравнения диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq l, \quad (66)$$

где  $l$  — толщина перегородки;  $D$  — коэффициент диффузии, величина которого зависит от свойств диффундирующей соли и перегородки. Для перегородок с крупными порами величина  $D$  определяется выражением для коэффициента диффузии электролита при отсутствии перегородки:

$$D_0 = \frac{2uvRT}{(u+v)zF^2}, \quad (67)$$

где  $u$ ,  $v$ ,  $R$ ,  $T$ ,  $F$  имеют обычное значение. С уменьшением размеров пор перегородки величина  $D$  становится ниже расчетного значения  $D_0$  и в перегородках с очень малыми порами  $D \approx 0$ .

Уравнение (66) решено в предположении сохранения постоянства концентраций  $C_1$  и  $C_2$  растворов, разделенных пористой перегородкой, что соответствует обычным условиям измерения диффузионно-адсорбционных э. д. с. в лаборатории.

Для больших значений  $t$  решение уравнения (66) будет:

$$Q = \frac{SDk_{\Pi}}{l} [t - t_{rp}] (C_2 - C_1), \quad (68)$$

где

$$t_{rp} = \frac{l^2}{6D} \frac{C_2 + 2C_1 - 3C_B}{C_2 - C_1} \quad (69)$$

нижняя граница времени становления стационарной диффузии;  $k_{\Pi}$  — пористость образца;  $C_B$  — концентрация воды, насыщающей образец;  $S$  и  $l$  — площадь поперечного сечения и длина образца.

Из анализа (69) следует, что время становления стационарной диффузии при постоянных  $C_B$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  и  $T$  зависит от типа электролита, толщины и пористости перегородки, размера пор перегородки. При прочих постоянных условиях время становления диффузии возрастает с увеличением толщины  $l$  перегородки и уменьшением ее пористости и радиуса поровых каналов.

Можно предположить, что время становления стационарной диффузии определяет время становления э. д. с. диффузионного происхождения. Расчет величины  $t_{rp}$  для типичных условий измерения  $E_{да}$  в лаборатории дает значения от нескольких минут до нескольких суток в зависимости от длины и характеристики образца породы, что в основном соответствует экспериментальным данным.

При постоянной длине образца и прочих неизменных условиях время становления будет возрастать с увеличением глинистости и уменьшением пористости образца.

### Выводы

1. Уравнения для диффузионно-адсорбционных э. д. с., полученные исходя из различных физических предпосылок, устанавливают следующие особенности этих э. д. с., согласующиеся с данными эксперимента:

а) величина  $E_{\text{да}}$  отличается от  $E_{\text{д}}$  тем больше, чем выше значение параметра  $q_{\text{п}}$ ;

б) зависимости  $E_{\text{да}} = f(\lg C)$  и  $E_{\text{да}} = f(\lg Q_{\text{в}})$  для различных  $q = \text{const}$  нелинейны при больших и средних значениях  $C$  за исключением предельных случаев неактивной ( $q = 0$ ) и идеально-адсорбирующей породы. В области низких значений  $C$  зависимости  $E_{\text{да}} = f(\lg C)$  стремятся к линейным;

в) диффузионно-адсорбционные э. д. с. подчиняются закону аддитивности;

г) значения  $E_{\text{да}}$ , измеренные при установившемся процессе диффузии солей при прочих постоянных условиях, не зависят от концентрации  $C_{\text{в}}$  раствора в порах образца.

2. Общее решение уравнения диффузии электролитов через адсорбирующую среду, которое позволило бы описать изменение э. д. с. диффузионного происхождения как в пространстве, так и во времени, отсутствует. Имеющееся решение позволяет оценить лишь время становления стационарной диффузии солей через образец.

3. Теоретический учет влияния сложного химического состава электролитов в растворах на величину  $E_{\text{да}}$  затруднен, во-первых, из-за громоздкости аналитических выражений для э. д. с. диффузионного происхождения в растворах со сложным составом, во-вторых, ввиду недостаточной изученности изотермы обменной адсорбции ионов на различных породах при сложном составе электролитов в растворах и в двойном электрическом слое. Качественно такой учет можно выполнить, используя уравнения (46) и (47).

4. Диффузионно-адсорбционную э. д. с., наблюдаемую в начале становления процесса диффузии, можно охарактеризовать уравнениями (39), (40), (41). Стабильное значение э. д. с., соответствующее установившейся диффузии, описывается уравнениями (61) и (62).

### § 10. О СВЯЗИ ДИФФУЗИОННО-АДСОРБЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ С ПАРАМЕТРАМИ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИМИ ГЛИНИСТОСТЬ И КОЛЛЕКТОРСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД

Выше рассматривались экспериментальные и теоретические данные о диффузионно-адсорбционной активности однородных искусственных и неоднородных естественных образцов, однако даже в последнем

случае объекты принимались однородными и давалась характеристика образца в целом. При практическом использовании данных метода собственных потенциалов наибольший интерес представляет возможность оценки по диаграммам  $U_{\text{СП}}$  содержания в породе глинистого материала и ее коллекторских свойств.

Прежде чем перейти к этим вопросам, остановимся на упрощенной модели терригенной породы, положенной в основу последующего изложения.

Как известно, песчаные и алевритовые породы состоят из отдельных обломочных частиц и характеризуются непрерывным спектром распределения частиц по размерам, вид которого устанавливают по данным гранулометрического анализа. В петрографии различают зерна скелетной фракции (песчаные и алевритовые), эффективный диаметр которых больше 0,01 мм, и остальные частицы меньшего размера, образующие высокодисперсную фракцию, которую обычно рассматривают как глинистую фракцию. Указанное значение эффективного диаметра, принимаемое в качестве верхнего предела для глинистых частиц, является спорным, например, более целесообразно было бы в качестве такого граничного значения  $d_{\text{эф}}$  выбрать 0,001 мм, однако поскольку значение  $d_{\text{эф}} = 0,01$  мм принято в геологической литературе, используем его в дальнейшем.

Наряду с различием в минералогическом составе скелетная и глинистая фракции терригенной породы редко отличаются по степени дисперсности, а следовательно, и полной поверхности и их адсорбционных свойств. Скелетную фракцию можно рассматривать как неактивную с точки зрения адсорбционных свойств и влагоемкости, а глинистую фракцию как адсорбционно-активную. Зерна скелетной фракции образуют жесткую матрицу — скелет терригенной породы, а глинистый материал присутствует в ней в виде цемента: контактного, заполнения пор или базального (рис. 19). Благодаря высокой дисперсности глинистого материала появление его в неактивном скелете приводит к существенному изменению влагоемкости, пористости и проницаемости породы, а также ряда геофизических параметров, в частности, диффузионно-адсорбционной активности [41, 74].

Задача последующего изложения состоит в том, чтобы показать, как влияет увеличение содержания глинистого цемента на изменение различных свойств терригенной породы. С этой целью вначале рассматриваются параметры, характеризующие глинистость породы, а затем связь между пористостью и глинистостью терригенных коллекторов.

Отметим еще два важных момента.

1. В терригенных породах помимо указанных выше двух основных компонент присутствуют различные виды цемента, отличные от глинистого, — силикатный регенерационный, а также карбонатный и железистый. Первый способствует сращиванию кварцевых скелетных зерен в единый каркас и является неактивным, поэтому с точки зрения изложенного выше его можно рассматривать как часть ма-

териала, образующего неактивный скелет породы. Карбонатный и железистый (обычно лимонитовый) цементы составляют так называемую растворимую компоненту породы и отсутствуют в той части ее, которая подвергается гранулометрическому анализу. Свойства

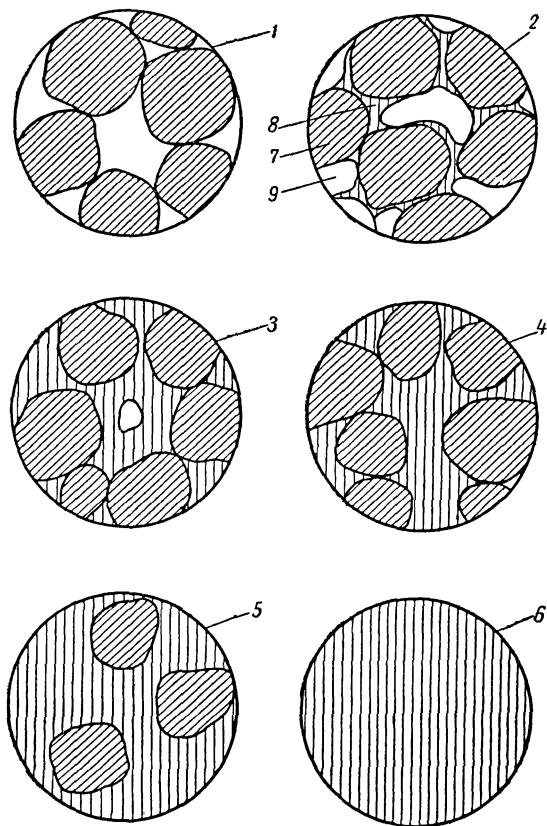


Рис. 19. Модели терригенной породы.

1 — чистый песок; 2 — слабо глинистый песок; 3, 4 — глинистые песчанки; 5 — песчаная глина, 6 — глина (1—3 — коллекторы; 4—6 — неколлекторы), 7 — зерна скелетной фракции; 8 — глинистый цемент, 9 — крупные поры.

этих видов цемента различны. Карбонатный цемент мало активен с точки зрения адсорбционных свойств, и его можно рассматривать как составную часть неактивного скелета. Напротив, железистый цемент по степени дисперсности приближается к глине; содержание его оказывает примерно то же влияние на параметры породы, что и содержание глинистого материала, и его следует рассматривать как часть адсорбционно-активного цемента.

2. В данном разделе рассматривается только глинистый или какой-либо другой высокодисперсный материал, равномерно распределенный в объеме породы, но не в виде других форм как, например, тонких прослоев или крупных включений.

### Параметры, характеризующие содержание глинистого материала в терригенной породе

Условимся считать глинистым весь высокодисперсный материал, присутствующий в породе, т. е. наряду с глиной также гидроокислы железа и алюминия. Содержание в породе такого материала чаще всего выражают отношением веса глинистой фракции  $P_{\text{гл}}$  к полному весу жесткого скелета породы  $P$ :

$$C_{\text{гл}} = \frac{P_{\text{гл}}}{P}. \quad (70)$$

Такое определение справедливо при отсутствии в породе растворимой компоненты. Если она имеется и навеска ее составляет  $p_r$ , то при расчете величины  $C_{\text{гл}}$  возможны следующие три варианта.

1. Растворимая компонента представлена высокодисперсным материалом, величину  $C_{\text{гл}}$  рассчитываем по формуле

$$C_{\text{гл}} = C'_{\text{гл}}(1 - C) + C. \quad (71)$$

Здесь  $C_{\text{гл}}$  — величина, определяемая выражением (70);  $C'_{\text{гл}}$  — содержание в породе пелитовой компоненты, определяемое при гранулометрическом анализе;  $C$  — содержание растворимой компоненты.  $C_{\text{гл}}$  и  $C$  выражаются в долях общего веса породы.

2. Растворимая компонента представлена неактивным веществом, например карбонатным цементом. Величина  $C_{\text{гл}}$  в этом случае определяется выражением

$$C_{\text{гл}} = C'_{\text{гл}}(1 - C). \quad (72)$$

3. Растворимая компонента частично состоит из высокодисперсного материала (вес  $P_{1p}$ ), частично из неактивного (вес  $P_{2p}$ ). Величина  $C_{\text{гл}}$  определяется выражением

$$C_{\text{гл}} = \frac{P_{\text{гл}} + P_{1p}}{P_{\text{гл}} + P_p + P_{\text{ск}}}, \quad (73)$$

где  $P_{\text{гл}}$  и  $P_{\text{ск}}$  — веса глинистых частиц и зерен скелетной фракции. Все значения  $P$  можно рассматривать как величины процентного содержания по весу соответствующей компоненты. Обычно отдельно величины  $P_{1p}$  и  $P_{2p}$  при стандартных методах анализа вещества породы не определяются и неизвестны, поэтому для сопоставления с другими параметрами практически используют значения  $C_{\text{гл}}$ , рассчитываемые по формуле (71) или (73), исходя из качественных

предположений о том, какая составная часть нерастворимой компоненты преобладает.

Представляет интерес также объемная глинистость  $K_{\text{гл}}$ , определяемая как отношение объема глинистого материала ко всему объему породы, включая и объем пор. При отсутствии в породе растворимой компоненты параметр  $K_{\text{гл}}$  определяется выражением

$$K_{\text{гл}} = \frac{V_{\text{гл}}}{V_{\text{ск}} + V_{\text{гл}} + V_{\text{п}}} = \frac{\frac{P_{\text{гл}}}{\delta_{\text{и гл}}}}{\frac{P_{\text{ск}}}{\delta_{\text{и ск}}} + \frac{P_{\text{гл}}}{\delta_{\text{и гл}}} + V_{\text{п}}}, \quad (74)$$

где  $\delta_{\text{и ск}}$  и  $\delta_{\text{и гл}}$  — минералогические плотности вещества скелетной и глинистой фракции;  $V_{\text{ск}}$ ,  $V_{\text{гл}}$ ,  $V_{\text{п}}$  — соответственно объемы скелета, глинистой фракции и порового пространства.

Практически величину  $K_{\text{гл}}$  удобнее рассчитать по формуле

$$K_{\text{гл}} = \frac{1 - k_{\text{п}}}{C_{\text{гл}} \frac{\delta_{\text{и гл}}}{\delta_{\text{и ск}}} - \frac{\delta_{\text{и гл}}}{\delta_{\text{и ск}}} + 1}. \quad (75)$$

Здесь  $k_{\text{п}}$  — коэффициент пористости.

Если  $\delta_{\text{и ск}} = \delta_{\text{и гл}}$ , то

$$K_{\text{гл}} = C_{\text{гл}} (1 - k_{\text{п}}). \quad (76)$$

При наличии в породе растворимой компоненты и равенства минералогических плотностей всех составных частей вещества породы величина  $K_{\text{гл}}$  рассчитывается по формулам: если растворимая компонента неактивна,

$$K_{\text{гл}} = C'_{\text{гл}} (1 - C) (1 - k_{\text{п}}); \quad (77)$$

если растворимая компонента представлена высокодисперсным веществом,

$$K_{\text{гл}} = [C'_{\text{гл}} (1 - C) + C] (1 - k_{\text{п}}). \quad (78)$$

В определении ряда свойств горной породы большое значение имеет также относительная глинистость  $\eta$

$$\eta = \frac{K_{\text{гл}}}{K_{\text{гл}} + k_{\text{п}}}, \quad (79)$$

характеризующая степень заполнения глинистым материалом пор неактивного скелета породы. Используемый в формуле (79) параметр  $K_{\text{гл}}$  в зависимости от состава породы определяется одним из выражений (75) — (78).

Учитывая, что глинистый материал в объеме пор породы занимает отдельные обособленные участки и при этом между глинистыми частицами, остаются поры, составляющие систему неэффективных поровых каналов, субкапилляров [74], представляет интерес также

параметр  $a$ , характеризующий степень заполнения пор агрегатами глинистого вещества с их внутренней пористостью  $k_{пц}$ :

$$a = \frac{\frac{K_{гг}}{1 - k_{пц}}}{\frac{K_{гг}}{1 - k_{пц}} + k_{пц}^{\max}}. \quad (80)$$

Как будет показано далее, величина  $k_{пц}$  является важной характеристикой состояния глинистого цемента в породе, изменяясь в зависимости от ряда условий в широких пределах. Очевидно, что величина  $f = 1 - a$  характеризует суммарный объем макропор и может быть использована для оценки верхнего предела коэффициента эффективной пористости терригенной породы. Параметры  $C_{гг}$ ,  $K_{гг}$ ,  $\eta$ ,  $a$  — характеризуют весовое или объемное содержание в породе глинистого материала.

Удельная  $Q_{п}$  и приведенная  $q_{п}$  емкости поглощения породы — комплексные параметры, характеризующие не только содержание глинистого материала, но и его дисперсность. Физический смысл их тот же, что и для однородных дисперсных систем. Для рассматриваемой двухкомпонентной модели твердой части терригенной породы выражения для параметров  $Q_{п}$  и  $q_{п}$  несколько усложняются.

Если допустить, что емкость поглощения глинистого материала составляет  $Q_{гг}$ , а материала скелетной фракции  $Q_{ск}$ , величину  $Q_{п}$  можно рассчитать по формуле

$$Q_{п} = Q_{гг}K_{гг}\delta_{гг} + Q_{ск}(1 - K_{гг} - k_{п})\delta_{ск}. \quad (81)$$

При

$$\delta_{ск} = \delta_{гг} = \delta_{п}$$

$$Q_{п} = [K_{гг}Q_{гг} + Q_{ск}(1 - K_{гг} - k_{п})]\delta_{п}. \quad (82)$$

При заметном содержании глинистого материала в породе, например, при  $K_{гг} > 0,01$ , учитывая, что обычно  $Q_{ск}$  на 2—3 порядка меньше, чем  $Q_{гг}$ , можно пренебречь вкладом в адсорбционную способность породы, вносимым скелетной фракцией. Тогда

$$Q_{п} = Q_{гг}K_{гг}\delta_{гг} = Q_{гг}(1 - k_{п})C_{гг}\delta_{гг}. \quad (83)$$

Нетрудно видеть, что правая часть равенства (83) отличается от правой части формулы (31) на множитель  $C_{гг}$ .

При

$$Q_{ск} \ll Q_{гг} \text{ и } \delta_{ск} = \delta_{п} = \delta_{п}$$

$$q_{п} = Q_{гг} \frac{K_{гг}}{k_{п}} \delta_{п}. \quad (84)$$

Учитывая формулу (79) имеем:

$$q_{п} = Q_{гг} \frac{\eta}{1 - \eta} \delta_{п}. \quad (85)$$

Выражение (85) связывает два параметра глинистой терригенной породы  $q_{п}$  и  $\eta$ , имеющие важное значение в определении диффузионно-адсорбционной активности и других электрохимических параметров

породы. Оно показывает, что приведенная емкость поглощения глинистой породы определяется относительной глинистостью породы  $\eta$  и адсорбционной способностью  $Q_{\text{гл}}$ , т. е. степенью дисперсности глинистого материала.

Если растворимая компонента породы представлена высокодисперсным материалом, то для вычисления параметров  $q_{\text{п}}$  и  $Q_{\text{п}}$  необходимо определять экспериментально среднюю величину всего вещества минерального скелета породы до обработки ее раствором кислоты и рассчитывать  $Q_{\text{п}}$  и  $q_{\text{п}}$  по формулам (83), (85), используя  $\bar{Q}$  вместо  $Q$ .

### О связи между коэффициентом пористости и глинистостью терригенных коллекторов

Величина коэффициента пористости терригенной породы определяется следующими факторами [41, 84].

1. Степенью окатанности и плотностью упаковки частиц достаточно однородных по размерам. При отсутствии в песке или алевролите с однородным составом зерен глинистого материала пористость его определяется взаимным расположением зерен. Чем меньше плотность укладки зерен, тем выше пористость. При прочих постоянных условиях плотность укладки будет уменьшаться с ухудшением окатанности зерен.

2. Гранулометрическим составом зерен скелетной фракции. Чем шире диапазон изменения размеров зерен скелетной фракции, т. е. чем хуже степень отсортированности зерен, тем меньше пористость породы. Естественно, что с увеличением содержания в песке или песчанике алевроитовых зерен, заполняющих пространство между крупными песчаными зернами, пористость уменьшается. Обычно пористость снижается с уменьшением величины медианного диаметра скелетных зерен [84].

3. Содержанием в породе тонкодисперсного цемента, в первую очередь, глинистого. Поскольку этот фактор играет решающую роль в определении пористости песчано-глинистых отложений, остановимся подробнее на его влиянии.

Пористость скелета породы  $k_{\text{п ск}}$  характеризуется объемом между зернами скелетной фракции. При отсутствии в породе глинистого цемента открытая пористость  $k_{\text{п}} = k_{\text{п ск}}$  (рис. 19).

При наличии глинистого материала в порах скелета пористость  $k_{\text{п}}$  определяется выражением

$$k_{\text{п}} = k_{\text{п ск}} - K_{\text{гл}}. \quad (86)$$

При одинаковой минералогической плотности частиц глины и скелетных зерен будет справедливо соотношение

$$k_{\text{п}} = \frac{k_{\text{п ск}} - C_{\text{гл}}}{1 - C_{\text{гл}}}. \quad (87)$$



Кривые  $k_{п} = f(C_{гл})$  для различных  $k_{п ск} = \text{const}$ , рассчитанные по формуле (87), отражают уменьшение пористости с увеличением глинистости породы (рис. 20). Однако заполнение глинистым материалом скелета с заданной пористостью может происходить только до известного предела, который зависит от плотности укладки частиц глинистого цемента или от его пористости  $k_{пц}$  [12]. Для каждой кривой точка, ограничивающая ее справа, имеет координаты:

$$C_{гл}^* = \frac{(1 - k_{пц}) k_{п ск}}{1 - k_{п ск} k_{пц}}, \quad (88)$$

$$k_{п} = k_{пц} k_{п ск}. \quad (89)$$

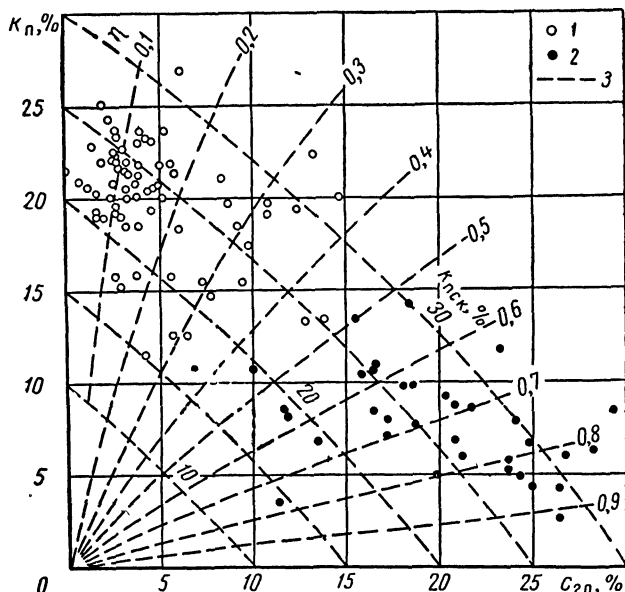


Рис. 20. Сопоставление параметров  $k_{п}$  и  $C_{гл}$  для песчаников и алевролитов девона Ромашкинского месторождения.

1 — коллектор; 2 — неколлектор; 3 — расчетные графики  $k_{п} = f(C_{гл})$  для различных  $k_{п ск} = \text{const}$ ,  $k_{п} = f(C_{гл})$  для различных  $\eta = \text{const}$ .

При изменении  $C_{гл}$  в интервале от нуля до  $C_{гл}$  для заданного  $k_{п ск} = \text{const}$  происходит увеличение относительного содержания в породе глинистого материала  $\eta$  и уменьшение объема, соответствующего крупным порам (рис. 19, 20). В первом приближении этот объем определяет максимальную величину эффективной пористости  $k_{п эф}^{\text{max}}$ , причем

$$k_{п эф}^{\text{max}} = k_{п ск} - \frac{C_{гл}(1 - k_{пц})}{1 - k_{пц}}. \quad (90)$$

Поры, расположенные внутри глинистого цемента, по-видимому, являются неэффективными — субкапиллярами, и объем их в основном будет определять содержание в породе связанной воды.

Близкий к изложенному подход для оценки верхнего предела эффективной пористости ранее использован В. Н. Кобрановой [40]. Вместо параметра  $k_{\text{пц}}$  В. Н. Кобрановой рассматривался коэффициент набухания глинистого материала. Очевидно, эффективная пористость в том смысле, как ее принято понимать, определяемая объемом пор, способных быть путями фильтрации флюидов, будет несколько меньше величины, рассчитываемой по формуле (90), так как отдельные крупные поры в скелете породы, не заполненные цементом, могут оказаться изолированными от системы сообщающихся эффективных пор. Область существования эффективных пор для фиксированного значения  $k_{\text{пц}}$  будет ограничена линией  $\eta = \text{const}$ , соединяющей точки с координатами  $C_{\text{гл}}^*$  и  $k_{\text{п}}^*$

$$\eta = 1 - k_{\text{пц}}, \quad (91)$$

если все пространство между зернами скелета равномерно заполнено цементом с пористостью  $k_{\text{пц}}$ .

Семейство графиков  $k_{\text{п}} = f(C_{\text{гл}})$  для различных  $k_{\text{п ск}} = \text{const}$  можно дополнить сопряженным с ним семейством кривых  $k_{\text{п}} = f(C_{\text{гл}})$  для различных  $\eta = \text{const}$  (рис. 20).

Терригенные породы без эффективных пор представлены моделями (рис. 19, 4—6). Их пористость определяется выражением

$$k_{\text{п}} = k_{\text{п ск}} k_{\text{пц}} = k_{\text{п ск}} (1 - \eta). \quad (92)$$

Если в области коллекторов основными являются кривые  $k_{\text{п}} = f(C_{\text{гл}})$  для различных  $k_{\text{п ск}} = \text{const}$ , а линии  $\eta = \text{const}$  дополняют их, то в области неколекторов основными графиками являются линии  $k_{\text{пц}} = 1 - \eta = \text{const}$ , а вспомогательными кривые  $k_{\text{п ск}} = \text{const}$ .

Характерно, что с увеличением глинистости в области  $k_{\text{пц}} = \text{const}$  пористость не уменьшается, а возрастает [41]. Это объясняется тем, что с ростом  $C_{\text{гл}}$  возрастает  $k_{\text{п ск}}$ : действительно, чем больше глинистого материала в породе, тем меньше скелетных зерен и больше пространство между ними. В области высоких значений  $C_{\text{гл}}$  физический смысл параметра  $k_{\text{п ск}}$  становится условным, так как скелетные зерна уже не касаются одно другого, а разобщены и «плавают» в глинистом цементе.

На рис. 20 сопоставлены значения  $k_{\text{п}}$  и  $C_{\text{гл}}$  для песчаников и алевролитов девона Ромашкинского месторождения. Их глинистость  $C_{\text{гл}}$  изменяется от нуля до 30%. С ростом  $C_{\text{гл}}$  пористость уменьшается. Корреляционная связь между параметрами  $k_{\text{п}}$  и  $C_{\text{гл}}$  для всей совокупности точек рис. 20 характеризуется уравнением регрессии  $k_{\text{п}} = -0,77 C_{\text{гл}} + 0,245$  при коэффициенте корреляции  $r = 0,85$ . Для точек, соответствующих только коллекторам, значение  $r$  снижается до 0,3.

Использование средних значений, соответствующих приведенному уравнению, для практических целей нецелесообразно. Анализ сопоставления параметров  $K_{\Pi}$  и  $C_{г\lambda}$  с помощью семейства расчетных графиков позволяет отметить следующие основные закономерности.

### Разделение коллекторов и неколлекторов <sup>1</sup>

Области, соответствующие коллекторам и неколлекторам, разделены «клином», заключенным между линиями с  $\eta = 0,4$  и  $\eta = 0,5$ . Границе примерно соответствует  $\eta = 0,45$ . Отсюда следует, что при установлении кондиций для подсчета запасов нефти и газа по тому или иному объекту нельзя ограничиваться одним значением параметра  $C_{г\lambda}$  или  $k_{\Pi}$ , характеризующим границу между коллектором и неколлектором, что нередко допускают в практике подсчета запасов. Необходимо указывать линию или область, объединяющую совокупность значений параметров  $k_{\Pi}$  и  $C_{г\lambda}$ , которая разделяет поля этих параметров, для коллекторов и неколлекторов. В данном случае такая область характеризуется интервалами  $k_{\Pi} = 11-15\%$  и  $C_{г\lambda} = 8-15\%$ .

#### Коллекторы

1. В области коллекторов большая часть точек расположена между линиями  $k_{\Pi ск} = 21\%$  и  $k_{\Pi ск} = 27$ , причем с ростом глинистости наблюдается тенденция к смещению точек в область больших значений  $k_{\Pi ск}$ . Это объясняется уменьшением компактности укладки зерен скелетной фракции с увеличением  $C_{г\lambda}$  за счет попадания части глинистого материала между скелетными зернами.

2. Уменьшение пористости коллекторов происходит примерно в одинаковой степени благодаря влиянию двух факторов: увеличению относительной глинистости  $\eta$  и уменьшению параметра  $k_{\Pi ск}$ . Величина последнего зависит от степени отсортированности зерен скелетной фракции и медианного диаметра их.

3. Увеличение параметра  $\eta$  и уменьшение параметра  $k_{\Pi ск}$  способствуют уменьшению не только пористости, но и проницаемости. Так, линия  $\eta = 0,2$  разделяет область коллекторов на две части. Для первой, расположенной слева от линии  $\eta = 0,2$ , характерны значения:  $k_{пр} > 200-300$  мд, для второй, заключенной между линиями  $\eta = 0,2$  и  $\eta = 0,4$ , значения  $k_{пр}$ , как правило, не превышают 200 мд. В пределах как первой, так и второй области, с уменьшением  $k_{\Pi ск}$  наблюдается тенденция к уменьшению проницаемости коллектора.

#### Неколлекторы

1. В области неколлекторов с ростом глинистости продолжается уменьшение пористости породы, поскольку уменьшается  $k_{пц}$ . В коллекторах цемент расположен в порах скелета, не испытывая геостатической нагрузки, поэтому пористость его достигает 50-70%.

---

<sup>1</sup> К коллекторам отнесены образцы с проницаемостью  $k_{пр} \geq 1$  мд, к неколлекторам — образцы с  $k_{пр} < 1$  мд.

В неколлекторах при заполнении глинистым материалом всего пространства между скелетными зернами значительная часть цемента или весь цемент испытывает геостатическую нагрузку. При высоком значении  $C_{гд}$  глинистый цемент может быть уплотнен примерно до такой же степени, как и чистые глины того же горизонта при аналогичном минеральном составе материала.

Для неколлекторов продуктивной толщи девона Ромашкинского месторождения  $k_{пц}$  уменьшается от 50 до 10%. Пористость глин этих отложений составляет 8—10%, т. е. соответствует нижнему пределу значения  $k_{пц}$ .

В связи с изменением  $k_{пц}$  в области неколлекторов с ростом  $C_{гд}$  происходит также изменение параметра  $\eta$ .

Для песчаников и алевролитов девона Туймазинского месторождения характерны примерно те же особенности связи параметров  $k_{п}$  и  $C_{гд}$  (рис. 21).

Для продуктивных терригенных отложений месторождения Газли области коллекторов и неколлекторов разделены полосой, ограниченной линиями  $\eta = 0,3$  и  $\eta = 0,4$  (рис. 22). Такое смещение границы в область более низких значений параметра  $\eta$ , возможно, объясняется более высокой пористостью глинистого цемента, поэтому порода становится неколлектором при меньших  $C_{гд}$ . В области коллекторов большая часть точек расположена между графиками  $k_{пск} = 28\%$  и  $k_{пск} = 42\%$ , что свидетельствует о менее плотной укладке или худшей степени окатанности зерен скелетной фракции, чем для отложений девона.

В области неколлекторов продолжается уменьшение пористости с ростом  $C_{гд}$ , пока значение  $k_{пц}$  не достигнет минимального значения (около 15%).

Вся область распространения точек для Газли расположена выше области точек для Ромашкино и Туймазы, что является результатом большей степени уплотнения осадков продуктивной толщи девона Татарии и Башкирии под действием более высокого геостатического давления при значительно более продолжительном времени действия нагрузки.

При сопоставлении параметров  $k_{п}$  и  $C_{гд}$  для образцов алевролитов и алевролитов хадумского горизонта Безопасненской площади и майкопской свиты Джанкойского газового месторождения (рис. 23) точки, соответствующие этим отложениям, расположены выше области точек для рассмотренных ранее месторождений. Это объясняется слабым уплотнением продуктивных отложений майкопского и хадумского возраста, которые имеют минералогический состав, существенно отличный от глин палеозоя, являются более молодыми и залегают на небольшой глубине до 800—1000 м.

Главной особенностью сопоставления параметров  $k_{п}$  и  $C_{гд}$  для этих отложений является незначительное изменение величины  $k_{п}$  при изменении  $C_{гд}$  в широком диапазоне от 10 до 80%. Для коллекторов хадумского горизонта характерна область значений  $\eta < 0,5$  и  $C_{гд} < 40\%$ . Пористость при изменении параметра  $C_{гд}$  от 10 до

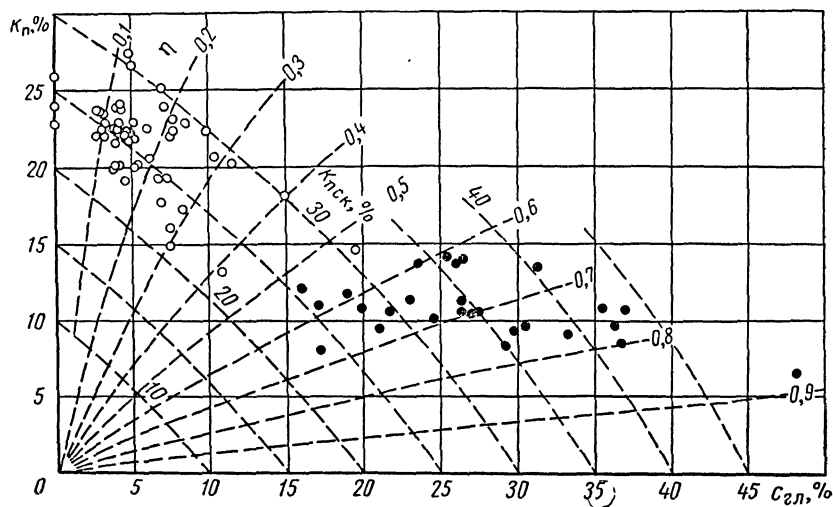


Рис. 21. Сопоставление параметров  $k_p$  и  $C_{зл}$  для песчаников и алевролитов девона Туймазинского месторождения.

Обозначения те же, что и на рис. 20.

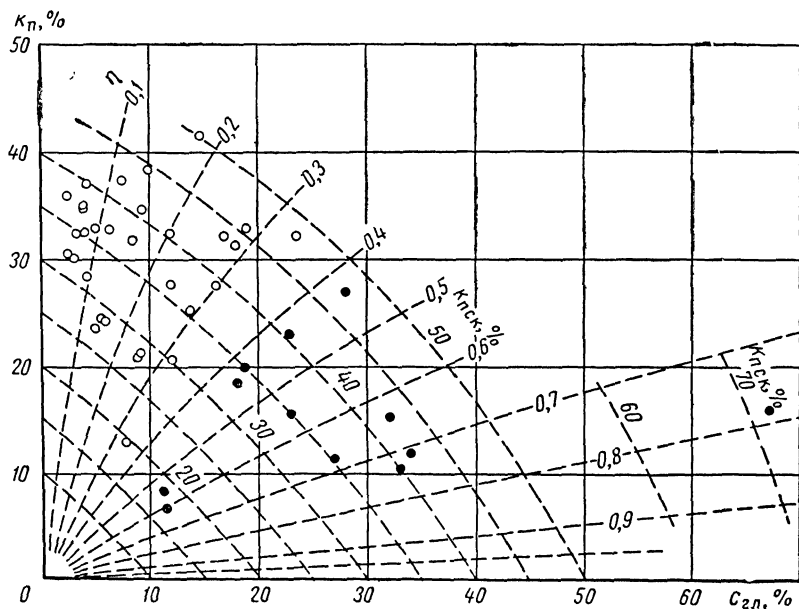


Рис. 22. Сопоставление параметров  $k_p$  и  $C_{зл}$  для песчаников и алевролитов мезозойских отложений месторождения Газли.

Обозначения те же, что и на рис. 20.

40% уменьшается с 37 до 28%. В области  $C_{гг} < 10\%$ , возможно увеличение пористости до значения примерно 40%, соответствующего, по А. А. Ханину, чистому, неглинистому алевроиту.

Другой особенностью является сравнительно узкая полоса разброса точек, что обусловлено хорошей отсортированностью скелетных зерен, представленных алевроитовым материалом.

В области неколлекторов при возрастании глинистости до 50—55% наблюдается дальнейшее уменьшение пористости до 24—26%. Затем при последующем росте глинистости пористость начинает

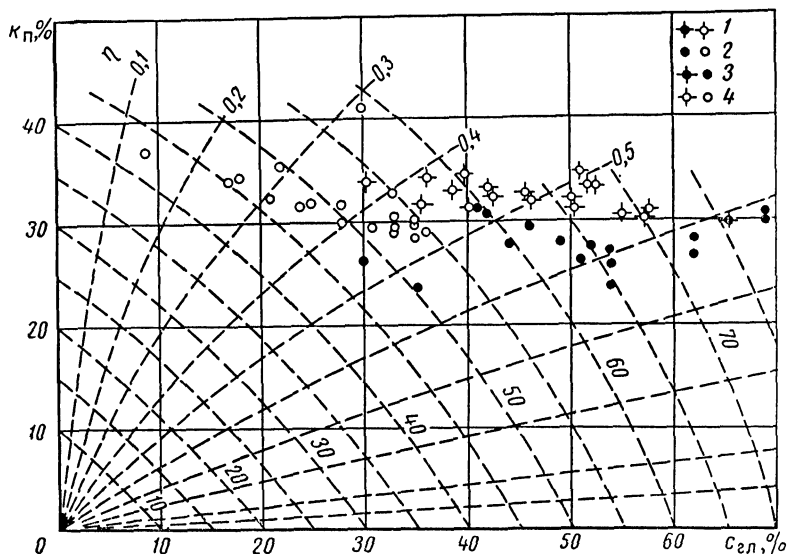


Рис. 23. Сопоставление параметров  $\kappa_{п}$  и  $C_{гг}$  для алевролитов.

1 — майкопа Джанкойского месторождения (по данным Л. М. Федина, Крымская геофизическая экспедиция); 2 — хадумского горизонта Безопасненского месторождения; 3 — неколлектор; 4 — коллектор.

медленно увеличиваться, но так, что степень уплотнения глинистого материала практически не меняется.

Резюмируем основные особенности связи между параметрами  $\kappa_{п}$  и  $C_{гг}$ , учет которых имеет большое значение при использовании данных метода СП и других геофизических методов для оценки коллекторов.

1. С увеличением глинистости породы наблюдается тенденция к уменьшению ее пористости до тех пор, пока скелетные зерна не становятся разобщенными. При дальнейшем увеличении глинистости пористость породы медленно возрастает, но пористость глинистого материала в породе практически не меняется, мало отличаясь от пористости глин данного горизонта.

2. С увеличением глинистости наблюдается закономерное возрастание параметра  $\eta$ , характеризующего соотношение объема

глинистых частиц и пор в породе. В области значений  $C_{\text{гл}}$ , где пористость глинистого материала не меняется, величина  $\eta$  также сохраняется постоянной.

Область, разделяющая совокупность значений  $k_{\text{п}}$  и  $C_{\text{гл}}$  на коллекторы и неколлекторы, характеризуется определенными значениями  $\eta$ . Для большинства терригенных отложений переход от коллектора к неколлектору происходит в случае  $\eta = 0,4-0,5$  при наличии в породе только рассеянного по объему глинистого материала.

3. Характер связи параметров  $k_{\text{п}}$  и  $C_{\text{гл}}$  определяется возрастом, глубиной залегания отложений, а также степенью отсортированности скелетных зерен. С увеличением возраста и глубины залегания отложений изменение пористости с ростом глинистости происходит более отчетливо.

Корреляционная связь между пористостью и глинистостью для коллекторов тем теснее, чем лучше отсортированы зерна скелетной фракции. Косвенно дисперсию связи при сопоставлении параметров  $k_{\text{п}}$  и  $C_{\text{гл}}$  для коллекторов можно охарактеризовать диапазоном изменения «пористости скелета»  $k_{\text{пск}}$  для исследуемой совокупности точек.

### Связь диффузионно-адсорбционной активности терригенных пород с их адсорбционной способностью и глинистостью

Экспериментальные данные показывают, что как и в случае однородных дисперсных систем диффузионно-адсорбционная активность терригенных пород наиболее тесно связана с параметрами  $q_{\text{п}}$  и  $Q_{\text{п}}$ , характеризующими их адсорбционные свойства (рис. 8). Особенно тесная по существу функциональная связь наблюдается между параметрами  $A_{\text{да}}$  и  $q_{\text{п}}$ . Общий характер ее сохраняется таким же, как и для однородных систем. Однако для реальных пород эта связь имеет некоторые особенности.

Рассмотрим упрощенную модель терригенной породы. Пусть неактивный скелет породы является идеальным грунтом, цилиндрические каналы которого постепенно заполняются глинистым материалом (рис. 24). Всю совокупность пород можно разделить на два класса — коллекторы и неколлекторы. Коллекторы можно представить в виде последовательности образцов с различной степенью заполнения  $a$  скелета глинистым материалом с постоянной пористостью  $k_{\text{пц}} = \text{const}$  и адсорбционной способностью  $Q = \text{const}$ . Для этой группы пород величина  $q_{\text{п}}$  определяется формулой

$$q_{\text{п}} = Q \frac{(1 - k_{\text{пц}})(1 - a + ak_{\text{пц}})}{ak_{\text{пц}}^2} \delta_{\text{и}} \quad (93)$$

и изменяется только за счет изменения параметра  $a$ . С ростом  $a$  в сечении каждого цилиндрического канала изменяется и соотношение площадей, соответствующих эффективным порам и глинистому цементу.

Рассмотрим теперь, как будет изменяться диффузионно-адсорбционная активность такого коллектора с изменением параметра  $a$ . На границе канала, частично заполненного глинистым цементом, и внешнего раствора возникнут различные э. д. с., каждая в пределах обособленного участка. Границе цемента с внешним раствором в пределах площади  $S_1$  будет соответствовать э. д. с.  $E_{\text{дац}}$ , величина которой зависит от параметра  $q$  цемента и концентраций растворов в порах породы  $C_v$  и внешнего  $C_2$ . На границе свободного раствора в макропоре и внешнего раствора в пределах площади  $S_2$  возникнет диффузионная э. д. с.  $E_d$ , определяемая при прочих постоянных условиях только величинами  $C_v$  и  $C_2$  (рис. 24).

Потенциал поля двойных слоев со скачками  $E_{\text{да}}$  и  $E_d$  в некоторой точке  $M$  можно вычислить по известной формуле [72]:

$$U_M = \sum_{i=1}^n \frac{\omega_i}{4\pi} E_i = \frac{\omega_1}{4\pi} E_{\text{да}} + \frac{\omega_2}{4\pi} E_d, \quad (94)$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — телесные углы видимости этих слоев из точки  $M$ .

При расстоянии  $R$  точки  $M$  от сечения поры значительно большем, чем размеры сечения, можно положить:

$$\omega_i = \frac{S_i}{4\pi R^2}. \quad (95)$$

При этом

$$U_M = \frac{S_1}{4\pi R^2} E_{\text{дац}} + \frac{S_2}{4\pi R^2} E_d. \quad (96)$$

Заменяем теперь реальные двойные слои в пределах участков  $S_1$  и  $S_2$  эквивалентным двойным слоем, который создавал бы в точке  $M$  такой же потенциал, как и реальные двойные слои. Скачок потенциала  $E_{\text{да}}$  такого слоя можно вычислить из соотношения:

$$\frac{S}{R^2} E_{\text{да}} = \frac{S_1}{R_1^2} E_{\text{дац}} + \frac{S_2}{R_2^2} E_d, \quad (97)$$

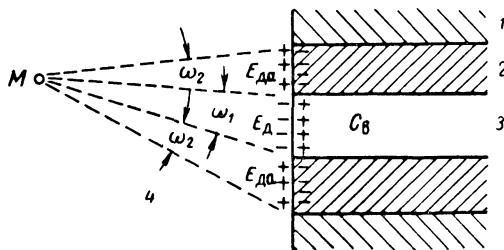
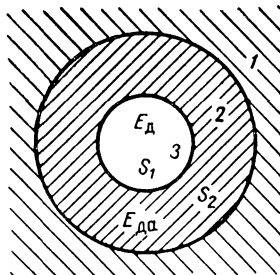


Рис. 24. К выводу формулы (99).

1 — неактивный скелет; 2 — глинистый цемент; 3 — эффективная пора; 4 — внешний раствор.



где  $S = S_1 + S_2$ . Отсюда

$$E_{\text{да}} = \frac{S_1}{S} E_{\text{дац}} + \frac{S_2}{S} E_{\text{д}}. \quad (98)$$

Рассмотренные условия отвечают фактическим условиям лабораторного измерения диффузионно-адсорбционных э. д. с. в электрохимической ячейке, так как расстояние до электродов (или электролитических мостиков) от торца образца гораздо больше, чем размеры любой самой крупной поры. При измерении потенциалов в реальных условиях имеем дело с полем, создаваемым двойными слоями, возникающими на сечениях множества пор. Однако нетрудно показать, что величина диффузионно-адсорбционной э. д. с. между растворами, разделенными образцом, будет такой же, как и для одной поры, если соотношение объемов, занимаемых глинистым цементом и свободным раствором в этой поре типично для подобного соотношения во всей породе.

Используя параметр  $\epsilon$ , выражение (98) приведем к виду:

$$E_{\text{да}} = E_{\text{дац}} a + E_{\text{д}} (1 - a). \quad (99)$$

В частном случае при десятикратном отношении  $C_2$  и  $C_в$  в области средних концентраций аналогичное выражение будет справедливо и для параметра  $A_{\text{да}}$ . Задаваясь конкретными значениями  $C_2/C_в$ ,  $k_{\text{щ}}$ ,  $Q_{\text{ц}}$ ,  $\delta_{\text{н}}$ , соответствующей величиной  $A_{\text{дац}}$  и изменяя  $a$  в пределах от нуля до единицы, можно рассчитать значения параметров  $A_{\text{да}}$  и  $q_{\text{ц}}$  по формулам (93), (99) и сопоставить их для одинаковых величин  $a$ .

Полученный таким образом расчетный график  $A_{\text{да}} = f(a)$  мало отличается от той части экспериментального для соответствующих условий, которая расположена в области коллекторов (рис. 8). В природе не выполняется ряд условий, принятых нами; прежде всего, характеристика глинистого цемента не остается постоянной с изменением его содержания в породе. Однако сопоставление расчетного и экспериментального графиков показывает, что основным фактором, определяющим величину  $A_{\text{да}}$  для коллекторов, является параметр  $a$ , тесно связанный с приведенной емкостью поглощения и относительной глинистостью породы.

Характер связи параметров  $A_{\text{да}}$  и  $q$ , который для некоторых условий близок к функциональной, сохраняется неизменным при переходе от однородных дисперсных систем к неоднородным, какими являются реальные терригенные породы. Учитывая это, следует связь величины  $A_{\text{да}}$  с каждым из параметров, характеризующих глинистость породы, оценивать с точки зрения тесноты связи этого параметра с приведенной емкостью поглощения  $q_{\text{ц}}$ . Очевидно, наиболее вероятно, что после параметра  $q_{\text{ц}}$  и сопряженного с ним  $Q_{\text{ц}}$  диффузионно-адсорбционная активность должна наиболее тесно зависеть от относительной глинистости породы.

Прежде чем перейти к анализу сопоставлений параметров  $A_{\text{да}}$  и  $\eta$  для различных отложений, попытаемся представить себе, какой

характер связи этих параметров должен быть при различной характеристике глинистого материала в породе. На рис. 25 приведены кривые  $A_{да} = f(\eta)$ , которые получены сочетанием экспериментальной зависимости  $A_{да}$  от  $q_{ц}$  (рис. 8) и расчетов по формуле (85). Следовательно, графики рис. 25 справедливы для условий, при которых получена кривая  $A_{да} = f(q)$ . Однако закономерности, вытекающие

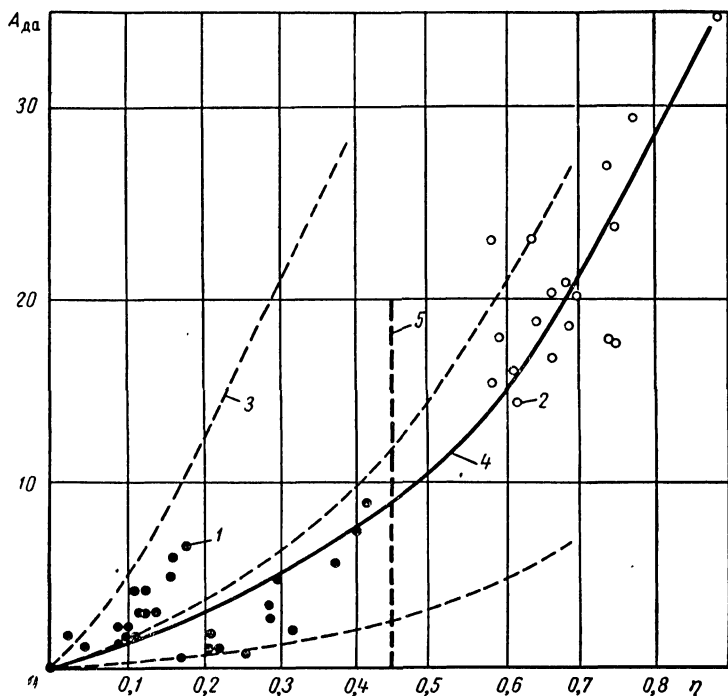


Рис. 25. Сопоставление параметров  $A_{да}$  и  $\eta$  для песчаников и алевролитов девона Туймазинского месторождения.

1 — коллектор; 2 — неколлектор; 3 — расчетные графики  $A_{да} = f(\eta)$ ; 4 — линия регрессии  $A_{да}$  на  $\eta$ ; 5 — граница коллектор — неколлектор.

из анализа графиков, приведенных на рис. 25, носят более общий характер и справедливы для различных условий измерения  $A_{да}$ .

При небольшой величине адсорбционной способности глинистого материала  $Q < 0,1 \frac{мг-экв}{г}$  расчетные кривые  $A_{да} = f(\eta)$  выполаживаются с уменьшением  $\eta$ . При  $Q > 0,2 \frac{мг-экв}{г}$  наоборот наблюдается выполаживание этих графиков в области высоких значений  $\eta$ . Исходя из этого, можно предположить, что, сопоставляя параметры  $A_{да}$  и  $\eta$  для исследуемой совокупности образцов при наличии отчетливой корреляционной связи между ними, по характеру этой

связи можно дать качественную оценку степени дисперсности глинистого материала.

Сопоставление значений  $A_{\text{да}}$  и  $\eta$ , измеренных на образцах терригенных пород девона Туймазинского и Ромашкинского месторождений (рис. 25), а также мезозойских отложений месторождения Газли обнаруживает наличие тесной связи между этими параметрами, причем характер связи соответствует случаю невысокой адсорбционной способности глинистого цемента, состоящего в основном из гидрослюд. На всех сопоставлениях обращает на себя внимание существенный разброс точек в области наиболее хороших коллекторов, который, по-видимому, обусловлен погрешностями в определении малых значений глинистости и значений параметра  $K_{\text{да}}$ , близких к величине  $K_{\text{д}}$ . В полулогарифмическом масштабе указанные зависимости принимают вид линейных. Коэффициент корреляции для приведенных сопоставлений изменяется от 0,85 до 0,92.

Влияние относительной глинистости на диффузионно-адсорбционную активность и поверхностную проводимость изучено на искусственных образцах (смесь маршалита с глиной различного минерального состава) во ВНИИГеофизике под руководством С. Г. Комарова (Д. А. Мельников, В. П. Шмарова); показана большая роль минералогии глинистого материала <sup>1</sup>.

Значениям  $\eta$ , характеризующим границу между коллекторами и неколлекторами, соответствуют определенные величины параметра  $A_{\text{да}}$  и относительного параметра:

$$A'_{\text{да}} = \frac{A_{\text{да}}}{A_{\text{да}}^{\text{max}}}, \quad (100)$$

где  $A_{\text{да}}^{\text{max}}$  — предельное значение  $A_{\text{да}}$  для данной совокупности точек. Величина  $A'_{\text{да}}$ , соответствующая границе коллектор — неколлектор, составляет: 0,26—0,29 для Туймазов, 0,19—0,21 для Ромашкино, 0,3—0,34 для Газли. Это создает принципиальные предпосылки для более обоснованного разделения пород на коллекторы и неколлекторы по данным метода потенциалов собственной поляризации в конкретном разрезе, для которого известен вид связи между  $A_{\text{да}}$  и  $\eta$ , и критические значения параметров  $A_{\text{да}}$  и  $\eta$ , соответствующие границе между коллектором и неколлектором.

Интересно выяснить, какими значениями параметра  $q_{\text{ц}}$  характеризуется граница коллектор — неколлектор для исследуемой совокупности отложений. Это можно установить, используя тесную связь между параметрами  $q_{\text{ц}}$  и  $\eta$ . Например, зная, что границе коллектор — неколлектор для терригенных пород девона Туймазинского месторождения соответствует среднее значение  $\eta = 0,45$ , а «зона неоднозначности» ограничена значениями  $\eta = 0,4—0,5$ , по графикам  $q_{\text{ц}} = f(\eta)$  для соответствующих значений  $Q_{\text{ц}}$  находим, что границы

<sup>1</sup> См. отчеты за 1961—1963 гг. по теме: «Разработка и усовершенствование методики оценки коллекторов и интерпретации данных каротажа скважин». Фонды ВНИИГеофизики.

«области неоднозначности» определяются  $q_n = 0,1-0,3$ , а среднее значение  $q_n$  для границы коллектор — неколлектор будет 0,2 (рис. 26). Это позволяет выделить области коллекторов и неколлекторов в системе графиков  $E_{да} = f(\lg C)$  для различных  $q_n = \text{const}$  (рис. 27). Отметим, что величина  $A_{да}$  существенно изменяется при изменении параметра  $\eta$  и в области неколлекторов. Это объясняется дальнейшим уплотнением глинистого цемента с ростом  $\eta$ .

На примере образцов глинистых песчаников и алевролитов Туймазинского месторождения видно, что величина  $A_{да}$  закономерно возрастает с уменьшением пористости цемента по линейному закону (рис. 30). Приведенную совокупность точек можно разбить на две группы по величине адсорбционной способности цемента. Нижней группе точек соответствует величина  $Q$  до  $0,06 \frac{\text{мг-эке}}{\text{г}}$ , а верхней — от  $0,07$  до  $0,11 \frac{\text{мг-эке}}{\text{г}}$ . Каждая из этих

групп закономерно располагается вдоль соответствующей прямой. Характерно, что более высокие значения  $Q$  в основном соответствуют образцам с большим содержанием глинистого материала и других видов активного цемента. Это указывает на связь между дисперсностью глинистого материала и его содержанием в терригенной породе: с увеличением глинистости породы глинистый материал становится более дисперсным.

Сравнительно тесной является связь параметра  $A_{да}$  с объемной  $K_{гд}$  и весовой  $C_{гд}$  глинистостью породы.

На рис. 28 приведены примеры сопоставления параметра  $A_{да}$  с величинами  $K_{гд}$  и  $C_{гд}$  по ряду месторождений. В широком диапазоне изменения  $K_{гд}$  и  $C_{гд}$  эти корреляционные связи можно

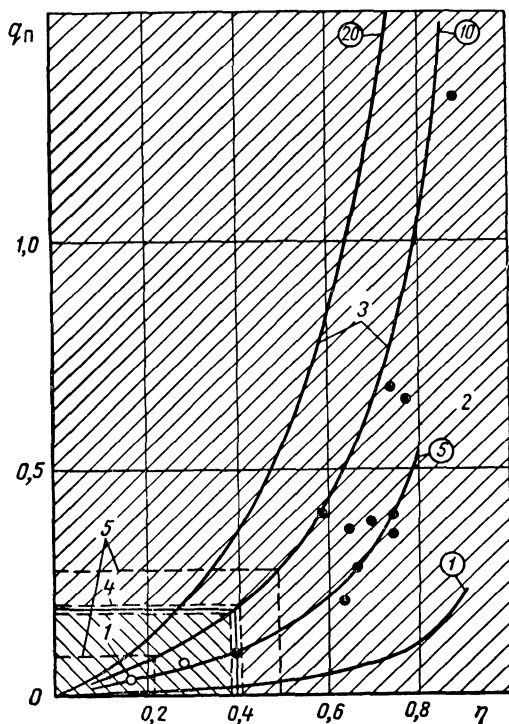


Рис. 26. Сопоставление параметров  $\eta$  и  $q$  для песчаников и алевролитов девона Туймазинского месторождения.

1 — коллекторы; 2 — неколлекторы; 3 — расчетные графики  $q = f(\eta)$ , шифр кривых —  $Q \cdot 10^2$ ; 4 — граница коллектор — неколлектор; 5 — границы области неоднозначности.

аппроксимировать прямыми. Коэффициент корреляции, вычисленный для сопоставлений (рис. 28, а), составляет соответственно 0,92 и 0,93. Нет оснований ожидать более тесной связи  $A_{да}$  с одним из параметров —  $K_{гд}$  или  $C_{гд}$ , что следует как из представлений

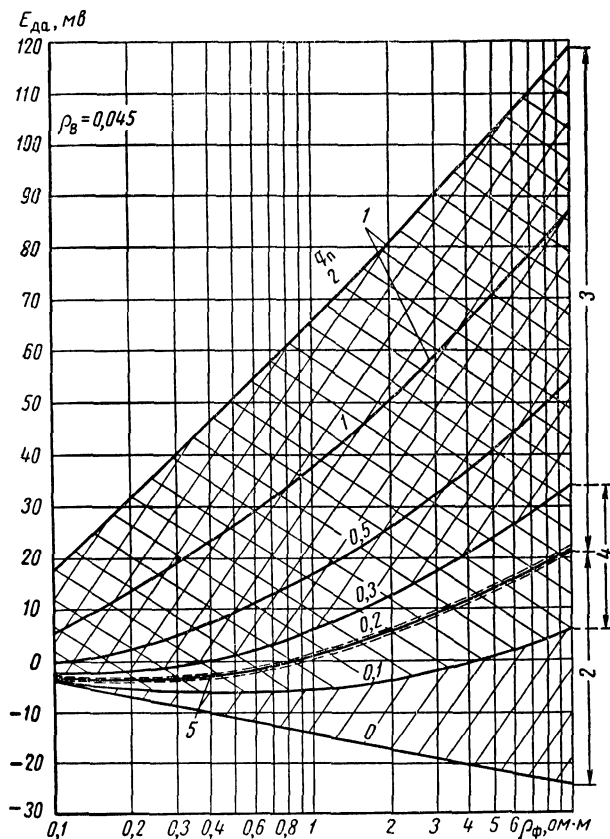


Рис. 27. К разделению терригенных отложений девона Татарии и Башкирии на коллекторы и неколлекторы по параметрам  $E_{да}$  и  $q$ .

1 — графики  $E_{да} = f(\lg C)$  (рис. 7); 2 — коллекторы; 3 — неколлекторы; 4 — область неоднозначности; 5 — граница коллектор — неколлектор. Шифр кривых —  $q_{II}$ .

о природе диффузионно-адсорбционной активности, так и из анализа данных экспериментов.

Изменение  $A_{да}$  с ростом  $K_{гд}$  и  $C_{гд}$  происходит в области, для которой характерно увеличение параметра  $\eta$  с ростом глинистости. В области высоких значений глинистости, где величины  $\eta$  и  $k_{пд}$  почти не изменяются с ростом  $C_{гд}$ , параметр  $A_{да}$  практически не зависит от содержания в породе глинистого материала [63, 81].

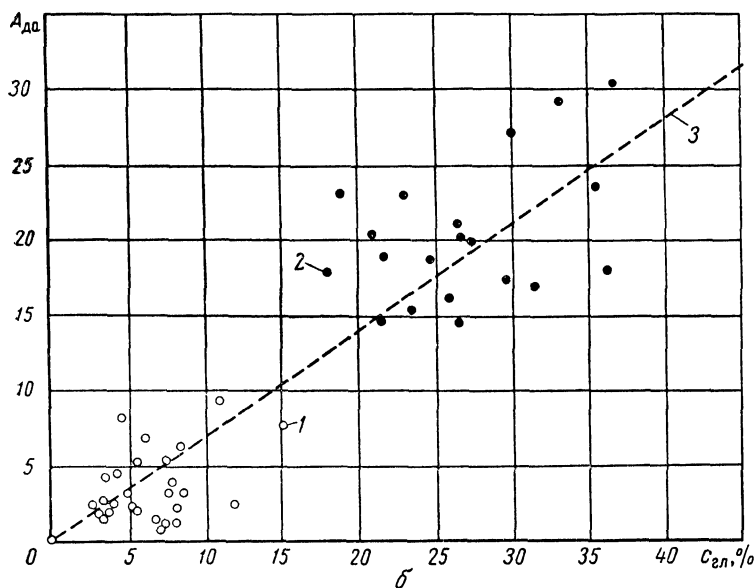
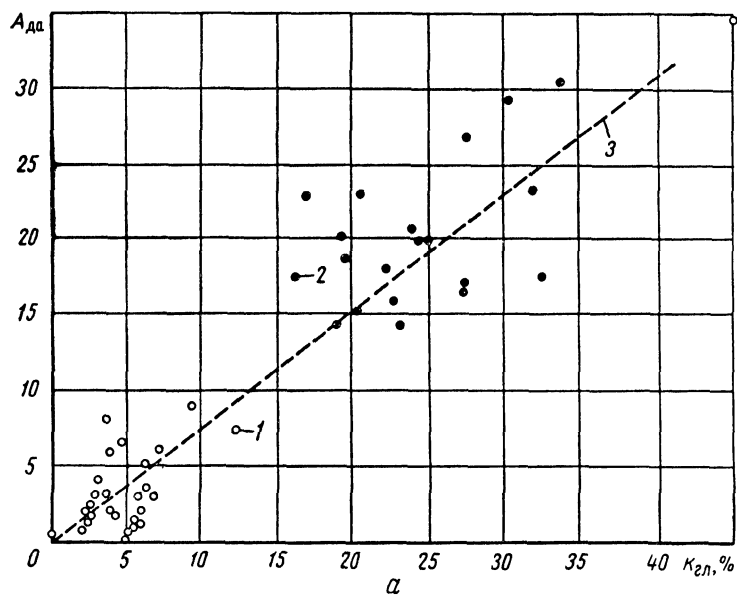


Рис. 28. Сопоставление параметров  $A_{да}$  и  $K_{гл}$  (а),  $A_{да}$  и  $C_{гл}$  (б) для песчаников и алевролитов девона Туймазинского месторождения. Величина  $C_{гл}$  является суммой содержания в породе глинистой и растворимой компонент.  
1 — коллектор; 2 — неколлектор; 3 — линия регрессии.

Учитывая изложенное, можно сделать следующие выводы.

1. В терригенных породах диффузионно-адсорбционная активность  $A_{\text{да}}$  отражает содержание в породе глинистого или другого высокодисперсного материала и определяется его адсорбционной способностью  $Q$  и степенью уплотнения.

2. Параметры  $K_{\text{гд}}$  или  $C_{\text{гд}}$  отражают принадлежность породы к одной из разновидностей: слабоглинистые и глинистые песчаники и алевролиты, глины песчаные или алевроитистые глины. Величина  $Q$  характеризуется в основном минеральным составом глинистого материала. В большей части терригенных отложений нефтяных и газовых месторождений глинистый материал представлен минералами группы гидрослюд, для которых величина  $Q$  составляет обычно  $(4 \div 20) \cdot 10^{-2} \frac{\text{мг-эКв}}{\text{г}}$ , не превышая в большинстве случаев  $(10 \div 12) \cdot 10^{-2} \frac{\text{мг-эКв}}{\text{г}}$ .

Величина  $k_{\text{пц}}$  изменяется в очень широких пределах. Для коллекторов, где глинистый цемент заполняет частично пространство между алевроитовыми и песчаными зернами (рис. 19), пористость глинистого материала превышает 60%. Очевидно, в этом случае пористость цемента определяется пластovým давлением в коллекторе и степенью набухания глинистых частиц [41]. Последняя будет зависеть от минералогии глинистого вещества, минерализации пластовых вод и содержания обменного катиона  $\text{Ca}^{++}$ : чем меньше содержание минералов из группы монтмориillonита и набухающих разновидностей гидрослюд, чем выше минерализация пластовых вод и содержание обменного  $\text{Ca}^{++}$ , тем меньше будет величина  $k_{\text{пц}}$  в глинистом коллекторе.

Изучение параметра  $k_{\text{пц}}$  в коллекторах имеет большое значение для оценки величины эффективной пористости и содержания остаточной воды.

Разностям терригенных пород, составляющим «пограничную зону» между коллекторами и неколлекторами, соответствуют значения  $k_{\text{пц}} = 45-60\%$ .

В неколлекторах, где глинистый материал заполняет все пространство между скелетными зернами и испытывает геостатическую нагрузку, пористость его резко уменьшается и определяется при прочих равных условиях глубиной залегания, возрастом отложений и минеральным составом глинистого материала.

3. Наиболее тесно величина  $A_{\text{да}}$  связана с параметрами  $q_{\text{п}}$  и  $Q_{\text{п}}$ , характеризующими адсорбционную способность породы. Несколько менее тесной является связь  $A_{\text{да}}$  с относительной глинистостью  $\eta$ , а также объемной  $K_{\text{гд}}$  и весовой  $C_{\text{гд}}$  глинистостью.

Вид зависимости  $A_{\text{да}}$  от  $\eta$  определяется пределами изменения адсорбционной способности  $Q_{\text{ц}}$  цемента, дисперсия зависимости тем меньше, чем уже пределы изменения  $Q_{\text{ц}}$ . При наличии тесной связи  $A_{\text{да}}$  с  $\eta$  создаются физические предпосылки для определения глинистости и пористости терригенных пород по данным комплекса одного

из методов, позволяющего определить пористость (нейтронного гамма-метода, метода сопротивлений или ультразвукового), и метода собственных потенциалов.

4. Параметр  $\eta$  для большей части алевролитов и песчаников можно использовать как критерий для разделения пород на группы коллекторов и неколлекторов. Учитывая наличие тесной связи  $A_{да}$  с  $\eta$  и зная конкретные значения  $\eta$ , соответствующие границе между коллекторами и неколлекторами для отложений определенного возраста из разрезов различных месторождений, можно усовершенствовать способы выделения коллекторов по данным метода собственных потенциалов.

### Связь диффузионно-адсорбционной активности терригенных пород с пористостью и проницаемостью

Наличие довольно тесной связи между пористостью и глинистостью терригенных пород различных геологических комплексов, с одной стороны, а также важная роль, которую играет глинистость породы в определении параметра  $A_{да}$ , с другой, позволили предположить, что между диффузионно-адсорбционной активностью и пористостью песчано-глинистых пород при известных условиях должна существовать связь [30].

В пределах этой зависимости выделяется несколько участков (рис. 29). Первый — соответствует области наиболее низких значений параметров  $\eta$ ,  $C_{гл}$  и наиболее высоких значений  $k_{п}$ . Это область слабо глинистых коллекторов. Здесь изменение пористости происходит в основном

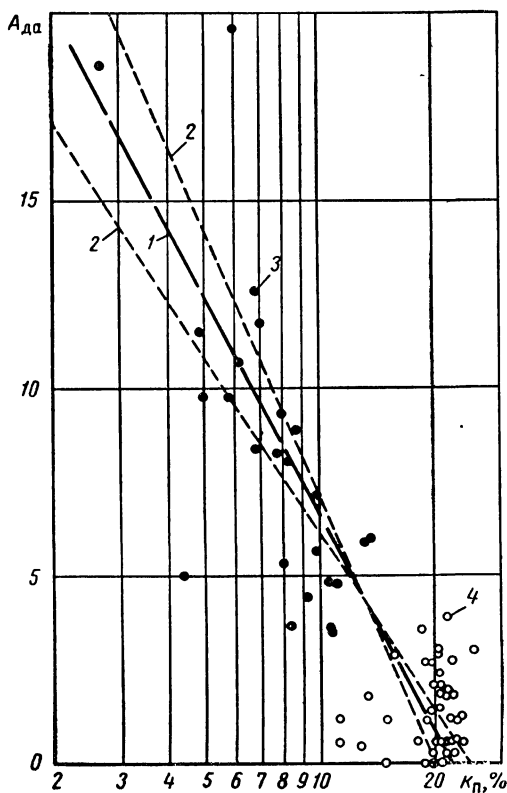


Рис. 29. Сопоставление параметров  $A_{да}$  и  $k_{п}$  для песчаников и алевролитов девона Ромашкинского месторождения.

1 — средняя линия регрессии; 2 — регрессии  $A_{да}$  на  $\lg k_{п}$  и  $\lg k_{п}$  на  $A_{да}$ ; 3 — неколлектор; 4 — коллектор ( $r = 0,82$ ).



вследствие изменения степени отсортированности и окатанности зерен скелетной фракции. Пористость этих коллекторов слабо зависит от содержания глинистого материала. Этой области значений  $k_{пц}$  соответствует выделенный участок связи между параметрами  $A_{да}$  и  $k_{пц}$ . Границы этого участка характеризуются различными значениями параметров  $k_{пц}$ ,  $\eta$ ,  $C_{гл}$ . Для коллекторов терригенной толщи девона Башкирии и Татарии эта область ограничена значениями  $\eta \leq 0,15 \div 0,25$ ,  $k_{пц} \geq 18 \div 20\%$ ,  $C_{гл} \leq 4 \div 5\%$ .

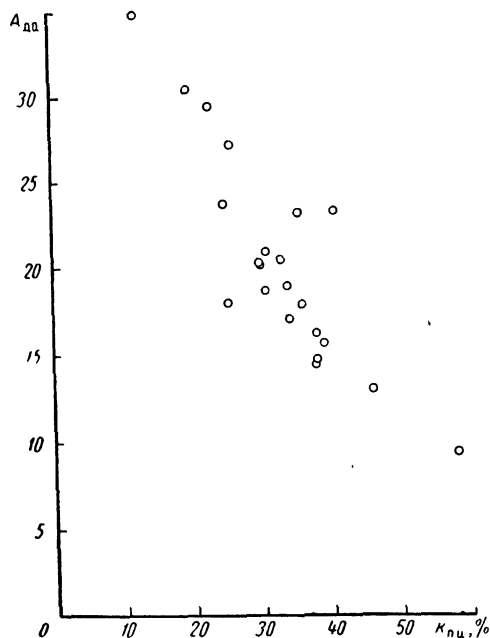


Рис. 30. Сопоставление параметров  $A_{да}$  и  $k_{пц}$  для непропицаемых алевролитов девона Туймазинского месторождения.

$A_{да}$  измерен на образцах при  $C_B = 3,9$  н.,  $C_1 = 0,4$  н.,  $C_2 = 0,04$  н.; значения  $k_{пц}$  рассчитаны по экспериментальным значениям  $C_{гл}$  и  $k_{пц}$ .

В области коллекторов со средней и высокой степенью глинизации изменение пористости происходит в основном за счет изменения глинистости. Здесь связь между параметрами  $A_{да}$  и  $k_{пц}$  становится более отчетливой. Границам этой области соответствуют, с одной стороны, указанные выше значения параметров  $\eta$ ,  $k_{пц}$ ,  $C_{гл}$ , с другой стороны, значения  $\eta$ ,  $k_{пц}$ ,  $C_{гл}$ , характеризующие (для пород данного геологического комплекса) границу коллектор — неколлектор.

Для неколлекторов при однородном составе глинистого цемента связь параметра  $A_{да}$  с пористостью породы достаточно тесная. Особенно тесная связь наблюдается с пористостью цемента  $k_{пц}$  (рис. 30), поэтому для

неколлекторов с высокой глинистостью, для которых значения параметров  $k_{пц}$  и  $\eta$  практически не меняются, величина  $A_{да}$  также сохраняется постоянной.

Наибольший практический интерес имеют две первые области. Очевидно, при наличии благоприятных условий возможно использование параметра  $A_{да}$  или тесно с ним связанных величин, например, относительной амплитуды  $U_{сп}$ , для разделения коллекторов на два класса: а) слабо глинистых и неглинистых; б) сильно глинистых, а также для оценки пористости в глинистых коллекторах.

Связь между параметрами  $A_{да}$  и  $k_{пц}$  практически отсутствует, если зерна скелетной фракции плохо отсортированы и изменение пористости для данной совокупности коллекторов происходит в ши-

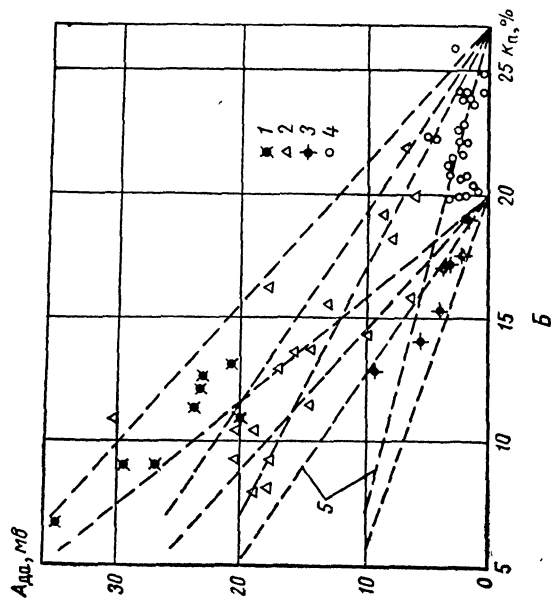
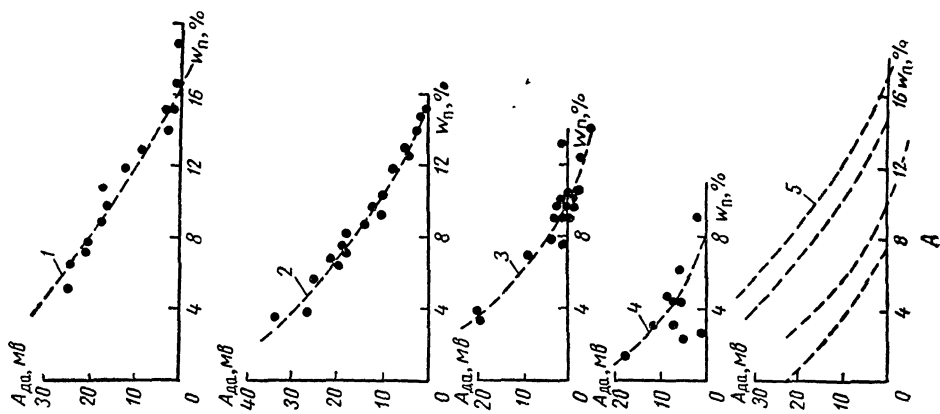


Рис. 31. Влияние минералогического состава цемента терригенных пород на связь между параметрами  $A_{да}$ , измеренном при  $c_p = 3,9$  н., и  $k_{ц}$ . Девон, Гуй-мазинская группа месторождений.

А — по В. Н. Кобрановой; Б — по Б. Ю. Вендельштейну. А — цемент: 1 — железистый, 2 — глинистый, 3 — опалово-халцедоновый; 4 — карбонатный, 5 — сопоставление зависимостей  $A_{да} = f(w_n)$  для пород с различным цементом; Б — цемент: 1 — железисто-глинистый, 2 — глинистый, 3 — карбонатно-глинистый, 4 — силикатно-глинистый, 5 — расчетные графики  $A_{да} = f(k_{ц})$  для различных  $k_{цск} = const$  и  $Q$  цемента.

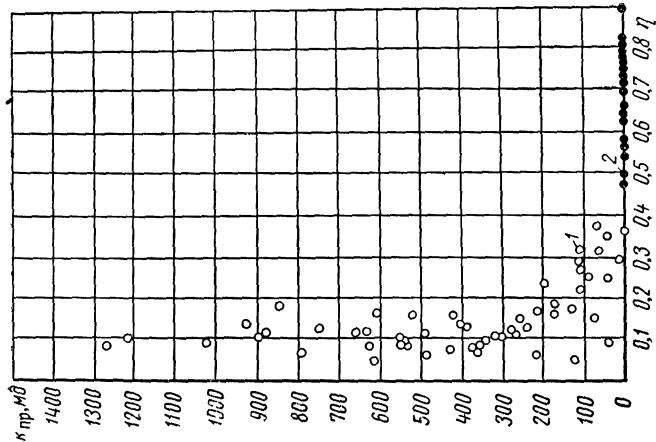


Рис. 32. Сопоставление параметров  $k_{пр}$  и  $\eta$  для песчаников и алевролитов девона Ромашкинского месторождения.  
1 — образцы с  $k_{пр} \geq 1$  мд; 2 — образцы, не проникаемые с  $k_{пр} < 1$  мд.

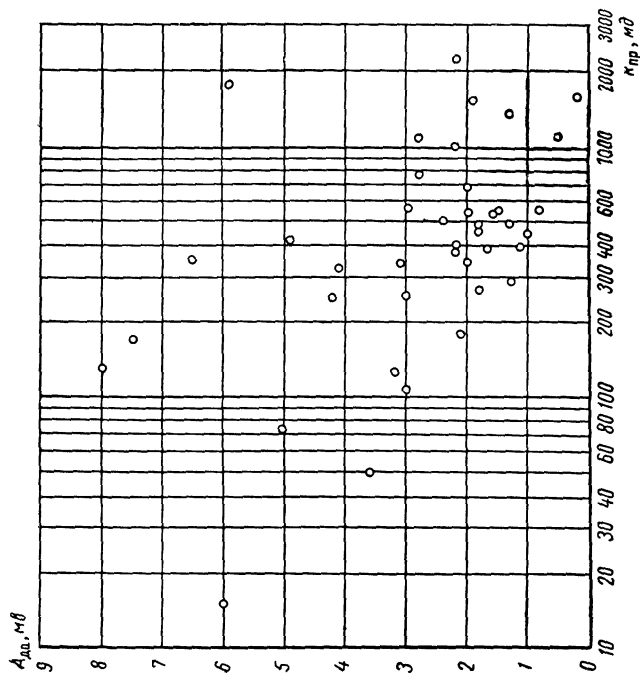


Рис. 33. Сопоставление параметров  $A_{да}$  и  $k_{пр}$  для терригенных пород девона Туймазинского месторождения ( $r = 0,48$ ).

роких пределах как за счет указанного фактора, так и за счет глинистости (рис. 31). Существенное влияние на связь между параметрами  $A_{да}$  и  $k_{п}$  оказывает минеральный состав цемента [42, 12] (рис. 31).

На наличие связи параметра  $A_{да}$  с коэффициентом проницаемости  $k_{пр}$  терригенного коллектора указывалось рядом авторов [2, 6, 32, 33, 51, 60, 64]. Авторы работ [6, 51] полагают, что корреляционная связь между параметрами  $A_{да}$  и  $k_{пр}$  для песчаников и алевролитов девона Ромашкинского месторождения является более тесной, чем между параметрами  $A_{да}$  и  $k_{п}$ .

Анализ имеющихся материалов приводит к следующему. При изучении проницаемости по данным  $A_{да}$  и  $\Delta U_{сп}$  из четырех рассмотренных выше областей представляют практический интерес только две первые, соответствующие коллекторам. Сопоставление параметров  $k_{пр}$  и  $\eta$  позволяет разделить все коллекторы также на две области, совпадающие с описанными ранее. В области хороших коллекторов четкой связи между параметрами  $k_{пр}$  и  $\eta$  нет. Здесь проницаемость в основном определяется средним эффективным гидравлическим радиусом пор, тесно связанным с медианным диаметром зерен скелетной фракции [51, 74, 83, 84].

При  $\eta > 0,15-0,20$  решающим фактором, определяющим величину проницаемости при прочих более или менее постоянных условиях, является относительная глинистость (рис. 32). В этой области наблюдается четкая связь между параметрами  $A_{да}$  и  $k_{пр}$  (рис. 33). Эта связь, вероятно, будет особенно тесной при стабильной кривой распределения диаметров зерен скелетной фракции, однородном минеральном составе глинистого или другого цементирующего материала.

#### Связь между параметром $A_{да}$ и коэффициентом водонасыщения в терригенных глинистых коллекторах

В работах [41, 74, 84] показано, что содержание связанной воды в терригенной породе в основном определяется дисперсностью породы. При отсутствии в породе глинистого материала содержание связанной воды, характеризуемое минимальным коэффициентом водонасыщения  $k_{в св}$ , зависит от присутствия в породе алевроитовых частиц. В этом случае связанная вода является главным образом молекулярно адсорбированной на поверхности частиц (адгезионной) и частично краевой или капиллярно удержанной водой. При наличии в породе глинистого материала появляется связанная вода, содержащаяся в субкапиллярах, пронизывающих массу глинистого цемента. Роль последней компоненты с увеличением глинистости породы возрастает и при значительной глинистости, например, при  $\eta > 0,05-0,1$ , она явится основной. Очевидно, что содержание связанной воды должно находиться в тесной связи с емкостью поглощения породы [74]. Это предположение, еще не подтвержденное экспериментально, на наш взгляд, вполне справедливо; уточним лишь, что, по-видимому, наиболее тесно величина  $k_{в св}$  будет связана с при-

веденной емкостью поглощения. Естественно предположить, что должна существовать также тесная связь между параметрами  $k_{в св}$  и  $\eta$ . Сопоставление экспериментальных значений  $k_{в}$  и вычисленных по экспериментальным данным А. А. Ханина значений  $\eta$  для коллекторов хадумского горизонта Ставрополя обнаруживает тесную связь этих параметров (рис. 34, а). Аналогичное наблюдается и при сопоставлении этих параметров по образцам из других отложений (рис. 34, б).

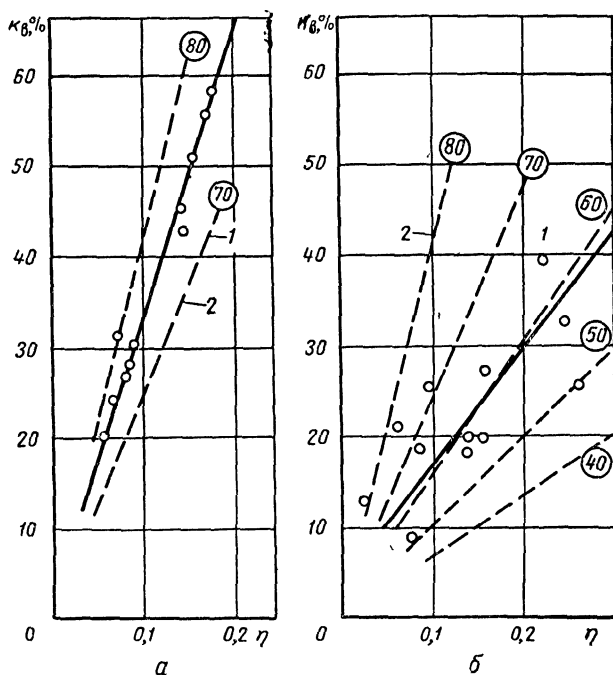


Рис. 34. Сопоставление параметров  $k_{в}$  и  $\eta$ .

а — для алевролитов хадумского горизонта Ставрополя (составлено по данным А. А. Ханина); б — для песчаников мезовой месторождения Газли (составлено по данным Г. А. Скобликовой). 1 — экспериментальные точки; 2 — расчетные графики  $k_{в} = f(\eta)$ . Шифр кривых —  $k_{пц}$ , %.

Исходя из представлений о модели глинистого коллектора, изложенных выше, для области с  $\eta > 0,05 \div 0,1$  можно предложить следующее соотношение между параметрами  $\eta$  и  $k_{в св}$ :

$$k_{в св} = \frac{\eta k_{пц}}{1 - \eta}. \quad (101)$$

Анализ сопоставлений  $k_{в св}$  и  $\eta$  (рис. 34) и использование графиков  $k_{в св} = f(\eta)$ , рассчитанных по формуле (101), позволяют оценить пористость глинистого цемента и пределы его изменения. Так, на-

пример, для зависимостей, изображенных на рис. 34, при изменении  $\eta$  в пределах от 0,05 до 0,20 величина  $k_{\text{шц}}$  изменяется незначительно — от 67 до 60%. С увеличением наклона зависимости  $k_{\text{в св}}$  от  $\eta$  происходит переход в область более высоких значений  $k_{\text{шц}}$ , т. е. более рыхлого цемента.

Наличие для глинистых терригенных коллекторов тесной связи между параметрами  $k_{\text{в св}}$  и  $\eta$ , с одной стороны, и между параметрами  $A_{\text{да}}$  и  $\eta$ , с другой, позволяет сделать вывод о возможности наличия тесной связи между параметрами  $A_{\text{да}}$  и  $k_{\text{в св}}$  в глинистых коллекторах при  $\eta > 0,05 \div 0,1$ . Это предположение может явиться предпосылкой для использования данных метода  $U_{\text{сп}}$  при оценке предельного возможного значения коэффициента нефтегазонасыщения, определяемого петрофизической характеристикой коллектора и позволяющего вычислить потенциальную емкость коллектора.

Связь между параметром  $A_{\text{да}}$  и коэффициентом водонасыщения  $k_{\text{в}}$ , нижним пределом которого является  $k_{\text{в св}}$ , исследовалась экспериментально В. Н. Дахновым, В. Н. Кобрановой [31] и теоретически Д. А. Шапиро [77].

Экспериментальные данные, а также результаты обработки промыслово-геофизических материалов показывают, что в неглинистых коллекторах изменение  $k_{\text{в}}$  влияет на величину диффузионно-адсорбционной активности меньше, чем в глинистых коллекторах. Уменьшение  $k_{\text{в}}$  приводит к увеличению параметра  $A_{\text{да}}$ . Используя модель (рис. 24), это можно объяснить изменением соотношения площадей  $S_1$  и  $S_2$ , соответствующих глинистому цементу и свободному раствору. В пределе, когда все эффективные поры насыщены нефтью или газом, на границе породы с внешним раствором возникает только э. д. с.  $E_{\text{да ц}}$ , соответствующая контакту цемента с внешним раствором. Увеличение параметра  $A_{\text{да}}$  в глинистом коллекторе с уменьшением  $k_{\text{в}}$  можно объяснить также изменением величины параметра  $q$ , рассчитываемого на часть объема пор, занимаемую водой, которая выражается произведением  $k_{\text{в}}k_{\text{п}}$  [77].

#### § 11. О СВЯЗИ ДИФфуЗИОННО-АДСОРБЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ С ГЛИНИСТОСТЬЮ И ДРУГИМИ ПАРАМЕТРАМИ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД

Основные отличия карбонатных пород от терригенных, определяющие характер связи диффузионно-адсорбционной активности с различными параметрами, характеризующими глинистость и коллекторские свойства породы, заключаются в следующем.

1. Если для терригенных глинистых коллекторов при определенных условиях отмечается зависимость между коллекторскими свойствами и глинистостью, в карбонатных коллекторах такая зависимость обычно отсутствует даже для пород с гранулярным типом пористости.

2. Неактивный скелет карбонатной породы растворяется в пластовой воде, что приводит к некоторому изменению химического состава вод.

3.  $\zeta$ -потенциал карбонатной породы может иметь различный знак в зависимости от условий образования породы, химического состава и концентрации солей в пластовых водах.

Первая особенность карбонатных пород является важной, и ее следует учитывать при исследовании их диффузионно-адсорбционной активности. Вторая и третья имеют ограниченное значение в силу некоторых обстоятельств.

В отложениях с водами высокой минерализации, например, в палеозойских отложениях Волго-Уральской нефтегазоносной области, минерализация и химический состав пластовых вод как в карбонатных, так и в терригенных породах для одних и тех же месторождений мало различаются. Это по-видимому, указывает на незначительную растворимость карбонатного скелета в этих водах.

Как показывают данные работ [23, 24], положительный  $\zeta$ -потенциал характерен для определенных типов карбонатных пород в основном магматического и гидротермального происхождения. Положительным значением  $\zeta$ -потенциала обладают также чистые осадочные известняки; например, по данным В. С. Кудрявцева, известняки с содержанием нерастворимого остатка меньше 1—2%.

Не вполне ясно — обладают ли отдельные разновидности карбонатов адсорбционной поверхностью того же порядка, что и глинистый материал, или дисперсность чистых карбонатных отложений значительно уступает таковой? Прямой ответ на этот вопрос еще не получен ввиду сложности экспериментального исследования адсорбционной поверхности чистых карбонатов и карбонатной части скелета глинистых карбонатных пород. Некоторые косвенные данные позволяют, однако, предположить, что для известных разновидностей карбонатных пород карбонатный скелет с точки зрения адсорбционной способности является практически неактивным по сравнению с глинистым и другими видами высокодисперсного материала (В. В. Поспелов, В. С. Кудрявцев).

В. С. Кудрявцевым исследована связь между параметром  $A_{да}$  и приведенной емкостью поглощения  $q_{п}$  образцов известняка с различной глинистостью. Величина  $q_{п}$  рассчитана в предположении, что носителем адсорбционной способности породы является только нерастворимый остаток, представленный преимущественно глинистым материалом. В этом случае

$$q_{п} = Q_{но} \frac{1 - k_{п}}{k_{п}} C_{но} \delta_{и}, \quad (102)$$

где  $Q_{но}$  — емкость поглощения нерастворимого остатка;  $C_{но}$  — весовое содержание нерастворимого остатка в породе.

По аналогии с выражением (84) предполагалось, что минералогические плотности карбонатного скелета  $\delta_{и ск}$  и нерастворимого остатка  $\delta_{и но}$  одинаковы:  $\delta_{и ск} = \delta_{и но} = \delta_{и}$ .

Сопоставление параметров  $A_{да}$  и  $q_{п}$  обнаруживает примерно тот же характер связи между ними, что и для терригенных пород при незначительной депрессии (рис. 35). Величина диффузионно-адсорбционной активности карбонатных пород изменяется в основном за счет изменения их глинистости, поскольку адсорбционная способность карбонатного скелета гораздо ниже, чем у глинистого материала.

Имеются данные ряда исследователей, позволяющие сопоставить величину диффузионно-адсорбционной активности  $A_{да}$  и относитель-

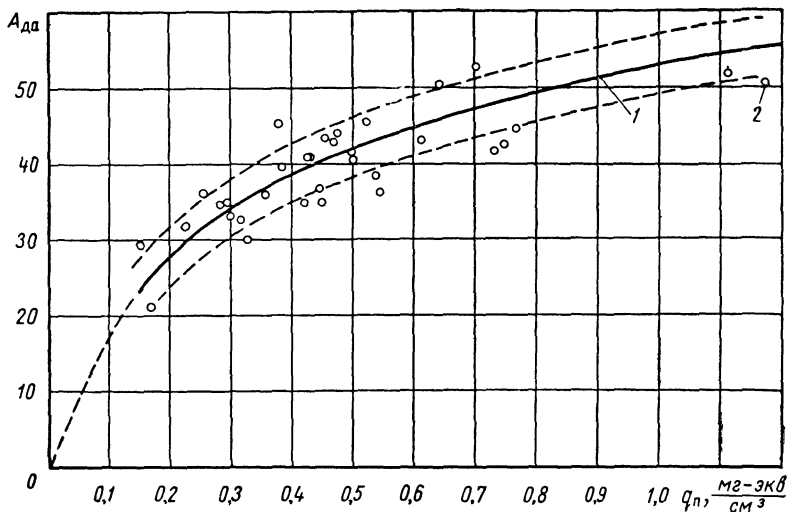


Рис. 35. Зависимость  $A_{да}$  от  $q_{п}$  для известняков верхнего мела Крыма (по В. С. Кудрявцеву).

1 — линия регрессии; 2 — экспериментальные точки.

ного содержания  $\eta_{но}$  нерастворимого остатка в карбонатном скелете [47, 49, 63, 81]. Этот параметр рассчитан по формуле

$$\eta_{но} = \frac{K_{но}}{K_{но} + k_{п}}, \quad (103)$$

которая аналогична по структуре формуле (99) для относительной глинистости. Только вместо объемной глинистости  $K_{гл}$  здесь используется объемное содержание нерастворимого остатка  $K_{но}$ . Значения  $K_{но}$  и  $K_{гл}$ ,  $C_{но}$  и  $C_{гл}$  в общем случае не тождественны, поэтому и параметр  $\eta_{но}$  может отличаться от величины  $\eta_{гл}$ . Основные причины этого отличия.

1. При обработке соляной кислотой растворяется не только карбонатный скелет, но и часть высокодисперсного материала — гидроокислы и некоторые алюмосиликаты; в этом случае  $C_{но} < C_{гл}$ , а следовательно,  $\eta_{но}$  при расчете по формуле будет занижено по



сравнению с  $\eta$ . Такое соотношение  $\eta_{\text{но}}$  и  $\eta$  будет типично при низких значениях  $C_{\text{но}}$  и  $C_{\text{гл}}$ .

2. В карбонатных породах с высоким  $C_{\text{но}}$  значительная часть нерастворимого остатка представлена алевритовыми, а иногда и песчаными частицами; в этом случае  $C_{\text{но}} > C_{\text{гл}}$ ,  $\eta_{\text{но}} > \eta$ .

В силу указанных причин связь между  $A_{\text{да}}$  и  $\eta_{\text{но}}$  будет, как правило, менее тесной, чем между  $A_{\text{да}}$  и  $\eta_{\text{гл}}$ , что наглядно демонстрируют данные рис. 36.

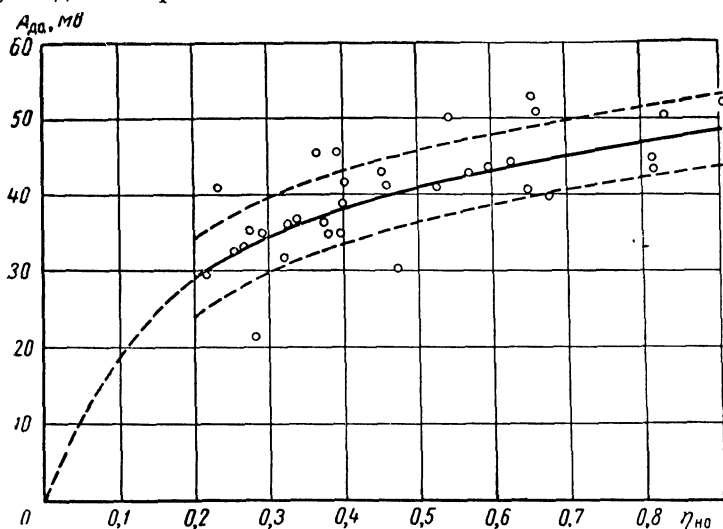


Рис. 36. Сопоставление параметров  $A_{\text{да}}$  и  $\eta_{\text{но}}$  для известняков верхнего мела Степного Крыма (по В. С. Кудрявцеву).

Связь параметра  $A_{\text{да}}$  с  $C_{\text{но}}$  и  $K_{\text{но}}$  для одних и тех же отложений, как правило, менее тесная, чем с параметром  $\eta$  (рис. 37).

Данные рис. 37 обнаруживают интересную особенность карбонатных пород: их диффузионно-адсорбционная активность достигает некоторого предельного значения при сравнительно небольшой величине  $C_{\text{но}}$ . Это объясняется тем, что большинство карбонатных пород имеет низкую пористость, поэтому незначительного количества глинистого материала достаточно, чтобы достичь предельного значения  $\eta_{\text{но}}$  и соответствующего ему значения  $A_{\text{да}}$  [49, 62, 81].

## § 12. ДИФФУЗИОННО-АДСОРБЦИОННАЯ АКТИВНОСТЬ И ПОВЕРХНОСТНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

Параметр пористости пород

$$P_{\Pi} = \frac{Q_{\text{вп}}}{Q_{\text{в}}}, \quad (104)$$

где  $Q_{\text{вп}}$  — удельное сопротивление породы, поры которой полностью насыщены водой с удельным сопротивлением  $Q_{\text{в}}$ .

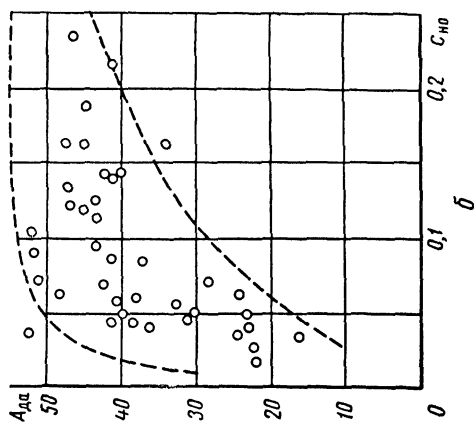
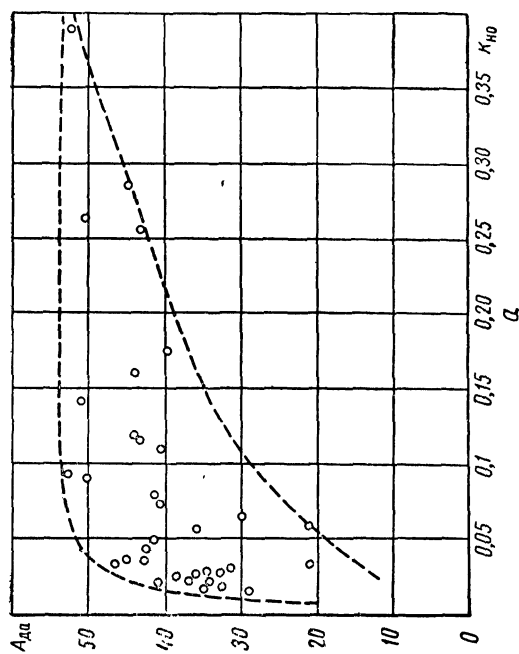


Рис. 37. Сопоставление параметров  $A_{да}$  и  $K_{но}$ ,  $C_{но}$  для карбонатных пород. Отложения верхнего мела: а — Стеного Крама (по В. С. Кудрявцеву); б — Грозненского Претцаккэа (по Л. В. Ефремовой).

У неглинистых пород параметр пористости постоянен для данной породы и определяется ее пористостью и структурой поровых каналов.

В породах, минеральный скелет которых содержит глинистый или другой высокодисперсный материал, величина параметра  $P_{\Pi}$  является функцией минерализации воды, насыщающей породу, и, следовательно, величины  $q_v$ . Предельное значение  $P_{\Pi}^{\text{пред}}$  параметра пористости наблюдается при насыщении глинистой породы концентрированным раствором электролита, например, NaCl. С ростом  $q_v$  величина  $P_{\Pi\phi}$  фиктивного или наблюдаемого параметра пористости уменьшается. Таким образом, в глинистой породе наблюдается дополнительная проводимость, способствующая снижению параметра пористости и удельного сопротивления породы [28]. Это явление было изучено электрохимиками на различных образцах искусственных и естественных пористых сред [82], при этом наблюдаемое снижение величины параметра  $P_{\Pi}$  было объяснено влиянием дополнительной проводимости двойного слоя на поверхности твердой фазы. В связи с этим данное явление получило название «поверхностная проводимость». В практике промысловой геофизики влияние поверхностной проводимости на величину удельного сопротивления впервые было отмечено Г. С. Морозовым [55] для нефтеносных песков и в общем случае сформулировано В. Н. Дахновым [26].

В дальнейшем исследовании поверхностной проводимости осадочных горных пород занимался ряд советских и зарубежных геофизиков [13, 58, 66, 75, 80]. И. Е. Эйрман ввел «коэффициент поверхностной проводимости»  $\Pi'$ , определяемый отношением

$$\Pi' = \frac{P_{\Pi}^{\text{пред}}}{P_{\Pi\phi}}, \quad (105)$$

показывающим, во сколько раз снизился параметр  $P_{\Pi}$  глинистой породы по сравнению с его предельным значением при насыщении ее раствором с удельным сопротивлением  $q_v$ .

В. Н. Дахновым и специалистами США для характеристики непостоянства параметра  $P_{\Pi}$  в глинистых породах применяется параметр «поверхностная проводимость»  $\Pi$ , являющийся обратной величиной предыдущего:

$$\Pi = \frac{1}{\Pi'} = \frac{P_{\Pi\phi}}{P_{\Pi}^{\text{пред}}}, \quad (106)$$

более удобный для практического использования.

Явление поверхностной проводимости достаточно полно исследовано на пористых перегородках при насыщении их слабо минерализованными растворами электролитов ( $C_v = 0,0001 \div 0,01$  н.), по сравнению с которыми двойной слой имеет более высокую электропроводность [82]. Отличием условий опыта в обширных исследованиях, выполненных впоследствии геофизиками, заключается в том,

что минерализация вод, насыщающих образец в этих работах, была более высокой ( $C_B = 0,01 \div 5$  н.). Однако по аналогии с выводами для объектов, исследованных электрохимиками, было принято, что и в области более высоких минерализаций наличие двойного слоя приводит к увеличению электропроводности каналов и, следовательно, к снижению удельного сопротивления породы и параметра  $P_{\Pi}$  по сравнению с его значением, определяемым геометрией пор и величиной пористости. Это положение не является справедливым, как это видно из следующего расчета [13].

Удельную электропроводность  $\sigma_{\text{кан}}$  поровых каналов любой капиллярной системы можно вычислить, рассматривая параллельное включение двух проводимостей. Первая соответствует свободному раствору и имеет удельную электропроводность  $\sigma_B$ , вторая — двойному слою с удельной электропроводностью  $\sigma_{\text{сл}}$ .

Для отдельных поровых каналов с правильной геометрией, например, для цилиндрического или щелевидного, будет справедливо соотношение:

$$\sigma_{\text{кан}} = \xi \sigma_B + (1 - \xi) \sigma_{\text{сл}}, \quad (107)$$

где  $\xi$ , как и ранее, представляет отношение площади сечения, занятой свободным раствором, к площади сечения всего канала.

В соответствии с изложенным выше

$$\sigma_B = C_B (u_B^- + v_B). \quad (108)$$

Нетрудно показать, что

$$\sigma_{\text{сл}} = \frac{u'q}{1 - \xi}, \quad (109)$$

если пренебречь долей проводимости, создаваемой анионами двойного слоя. Здесь  $u'$  — подвижность катионов двойного электрического слоя;  $q_{\Pi}$  — адсорбционная способность породы. Следовательно:

$$\sigma_{\text{кан}} = u'q_{\Pi} + C_B \xi (u_B + v_B). \quad (110)$$

Истинный параметр пористости  $P_{\Pi}$ , определяемый только геометрией пор и коэффициентом пористости, вычисляется по формуле

$$P_{\Pi} = \frac{Q_{\text{вп}}}{Q_{\text{кан}}}, \quad (111)$$

где  $Q_{\text{кан}}$  — удельное электрическое сопротивление поровых каналов, причем  $Q_{\text{кан}} = \frac{100}{\sigma_{\text{кан}}}$ , если  $\sigma_{\text{кан}}$  выражена в  $\text{ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , а  $Q_{\text{кан}}$  в  $\text{ом} \cdot \text{м}$ .

Обычно же параметр пористости рассчитывают по формуле (104), в которой

$$Q_B = \frac{10}{\sigma_B}. \quad (112)$$

Отношение значений  $P_{пф}$  и  $P_{п}$  с учетом выражений (104)–(107) определяет величину поверхностной проводимости:

$$\Pi = \frac{P_{пф}}{P_{п}} = \frac{\sigma_{в}}{\xi \sigma_{в} + (1 - \xi) \sigma_{сл}}. \quad (113)$$

Рассмотрим частные случаи.

1. При  $\xi = 1$  величина  $\Pi = 1$  и  $P_{пф} = P_{п}$ . Это случай неглинистой породы, когда толщина двойного слоя пренебрежимо мала по сравнению с радиусом поровых каналов. Поверхностная проводимость отсутствует.

2. Если  $\xi = 0$ , двойной слой целиком заполняет поровые каналы, проводимость которых определяется только электропроводностью слоя. В этом случае

$$\Pi = \frac{\sigma_{в}}{\sigma_{сл}}. \quad (114)$$

3. Когда  $0 < \xi < 1$ , свободный раствор и двойной слой занимают конечные обособленные участки объема пор и величина  $\Pi$  определяется соотношением величин  $\sigma_{в}$  и  $\sigma_{сл}$ .

Учитывая, что  $u'$  составляет  $0,01 u_{в} - 0,1 u_{в}$ , а значение  $q$  в породах с высоким содержанием глинистого материала не превышает нескольких нормалей, можно прийти к выводу, что в области высокой минерализации свободного раствора, например, при  $C_{в} > 0,1 - 0,5$  н., величины  $\sigma_{сл}$  и  $\sigma_{в}$  станут соизмеримыми, а затем  $\sigma_{сл}$  будет ниже  $\sigma_{в}$ . В этом случае наблюдается снижение общей электропроводности канала за счет влияния двойного слоя в отличие от широко известного явления увеличения электропроводности в области низких концентраций. Изложенное выше подтверждает ранее выдвинутую гипотезу В. Н. Дахнова [27] об уменьшении электропроводности глинистых пород, насыщенных водой высокой минерализации, и показывает, что явление поверхностной проводимости в глинистых породах имеет место не во всем диапазоне концентраций, а лишь в области низких  $C_{в}$ , примерно при  $C_{в} < 0,05 - 0,1$  н. При  $C_{в} > 0,5$  н. наличие двойного электрического слоя будет приводить не к снижению, а к завышению параметра  $P_{пф}$ , вычисляемого по формуле (104), по сравнению с истинным параметром пористости  $P_{п}$ . Поэтому в области низких концентраций увеличение степени дисперсности породы должно приводить к снижению параметра  $P_{пф}$ , а в области высоких концентраций — к его увеличению.

В глинистых породах параметры  $P_{п}$  и  $P_{п}^{пред}$  неодинаковы и  $P_{п} \leq P_{п}^{пред}$ . Однако для практических целей удобнее пользоваться параметром  $P_{п}^{пред}$  и коэффициентом  $\Pi$ , вычисляемым по формуле (106), поскольку дисперсия корреляционной связи между величинами  $P_{п}$  и  $k_{п}$  является минимальной при насыщении образцов раствором высокой минерализации. В этом случае  $P_{п} = P_{п}^{пред}$ .

Основной особенностью параметра  $\Pi$  является тесная связь его с величиной среднего радиуса поровых каналов и приведенной ем-

костью поглощения  $q_{\Pi}$ . Это находит отражение в формулах (110), (113) и подтверждается фактическим материалом по естественным и искусственным образцам (рис. 38).

В работе [75] приведены экспериментальные графики  $\Pi = f(q_{\Pi})$  для различных значений параметра  $b = \text{const}^1$ . После перехода от  $b$  к  $q_{\Pi}$  получаем семейство кривых (рис. 39). Отсюда видим существование тесной, практически функциональной связи параметра  $\Pi$  с диффузионно-адсорбционной активностью и относительной глинистостью пород.

На рис. 40 приводится сопоставление параметров  $\Pi$  и  $A_{\text{да}}$  образцов песчаников и алевролитов из терригенной толщи девона Туймазинского месторождения. Для части образцов из этой же совокупности найдены зависимости, связывающие эти параметры с приведенной емкостью поглощения  $q_{\Pi}$  (рис. 8, 38). Оба сопоставления получены для фиксированного значения  $q_{\text{в}}$ .

Практический интерес представляет дифференциация связи параметров  $P_{\Pi}$  и  $k_{\Pi}$  при различной минерализации воды, насыщающей породу, с помощью третьего параметра, характеризующего адсорбционные свойства породы —  $A_{\text{да}}$ ,  $q_{\Pi}$  или  $\eta$ .

В работе [17] такая дифференциация выполнена по параметру  $q$  для большого числа образцов, насыщенных минерализованным раствором. Из представлений о природе поверхностной проводимости, изложенных в работах [77, 80, 82], следовало, что увеличение глинистости или адсорбционной способности породы, характеризующей параметром  $q_{\Pi}$ , при любой минерализации воды, насыщающей породу, должно приводить к снижению величины  $P_{\Pi}$  или, по крайней мере, к сохранению  $P_{\Pi}$  неизменным. Данные [17] показывают, что при насыщении образцов раствором высокой минерализации увеличение глинистости приводит к завышению параметра  $P_{\Pi}$ , что согласуется с изложенной выше гипотезой и не может быть объяснено с помощью прежних представлений. Одновременно следует заметить, что при этих условиях «электрохимический фактор» дисперсии

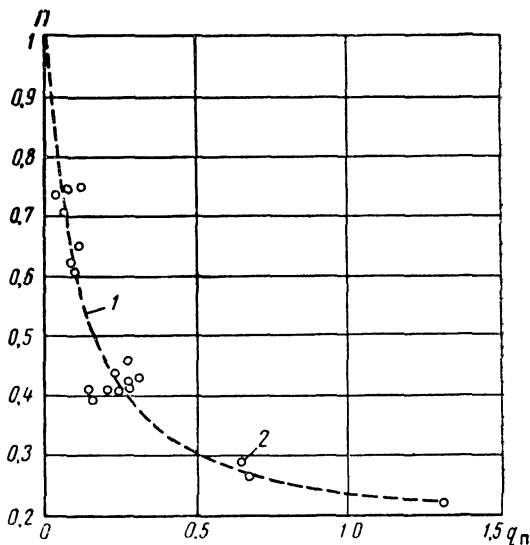


Рис. 38. Зависимость параметра  $\Pi$  от  $q_{\Pi}$  для песчаников и алевролитов девона Туймазинского месторождения.

1 — линия регрессии; 2 — экспериментальные точки.

<sup>1</sup> Параметр  $b$  связан с  $q_{\Pi}$  соотношением:  $b = -0,135 q_{\Pi} - 0,0055$ .

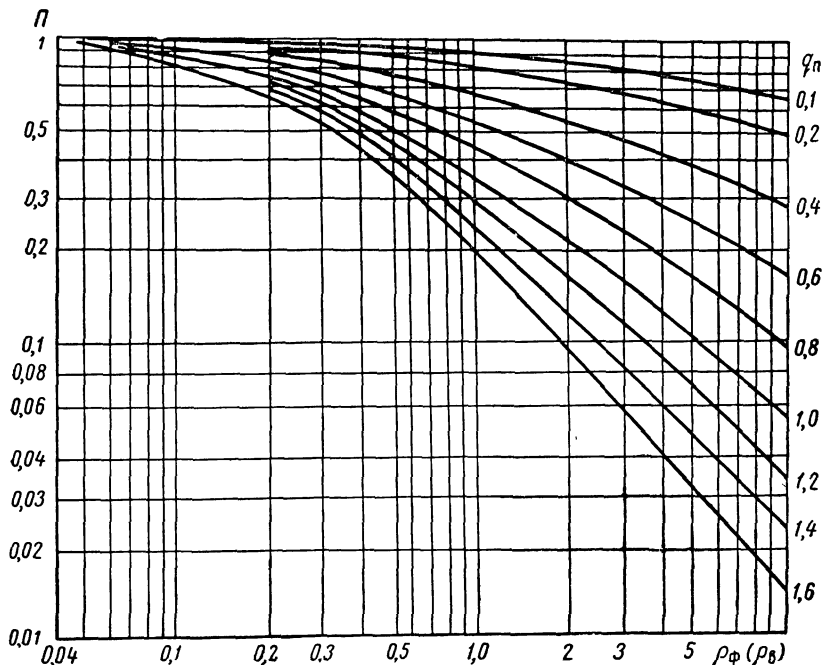


Рис. 39. Экспериментальные зависимости  $\Pi = f(\rho\phi)$  для терригенных пород (по Х. Хиллу, И. Милберну).

Шифр кривых —  $q_{\Pi}$  в  $\frac{\text{мг} \cdot \text{см}^3}{\text{см}^3}$ . Растворы NaCl,  $q_B = 0,045 \text{ см} \cdot \text{м}$ ,  $t = 25^\circ \text{C}$ .

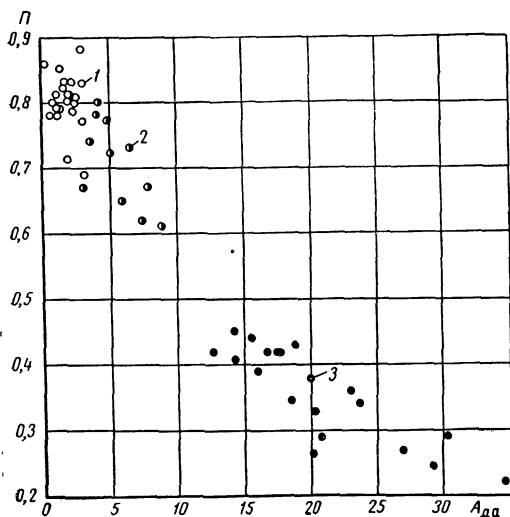


Рис. 40. Сопоставление параметров  $A_{\text{да}}$  и  $\Pi$  терригенных пород девона Туймазинского месторождения.

Растворы NaCl.  $\Pi$  определено при  $C_{B1} = 3,9 \text{ н.}$  и  $C_{B2} = 0,04 \text{ н.}$ ,  $A_{\text{да}}$  при  $C_1 = 0,4 \text{ н.}$ ,  $C_2 = 0,04 \text{ н.}$ ,  $C_B = 3,9 \text{ н.}$ ,  $t = 20^\circ \text{C}$ .  
1 —  $A_{\text{да}} < 3 \text{ мв}$ ; 2 —  $3 \text{ мв} < A_{\text{да}} < 10 \text{ мв}$ ; 3 —  $A_{\text{да}} > 10 \text{ мв}$ .

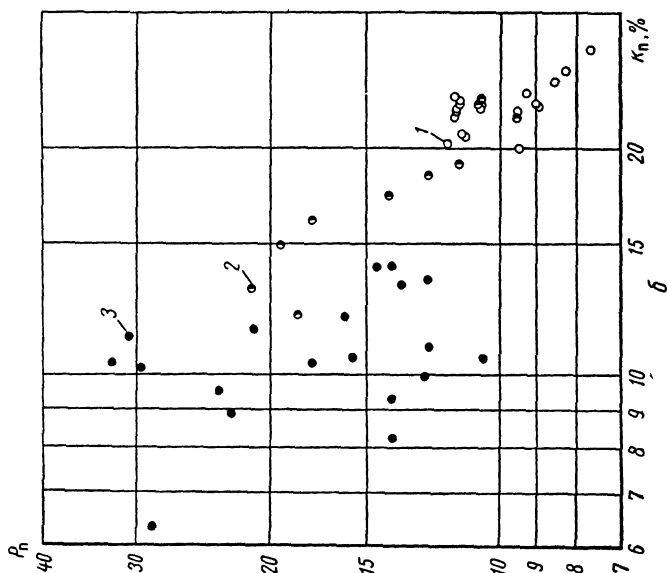
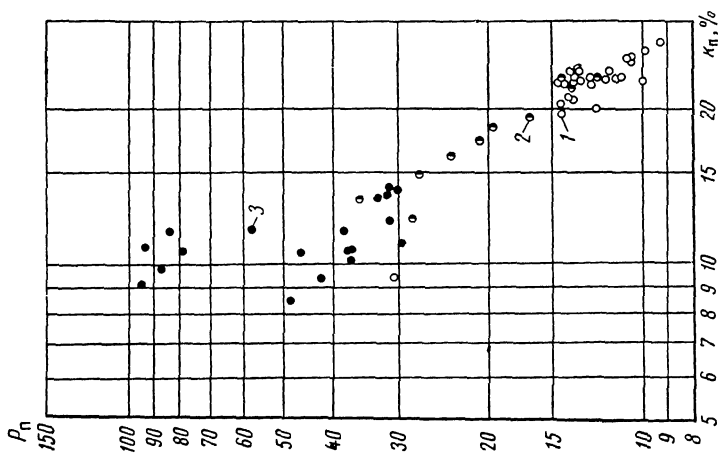


Рис. 44. Дифференциация зависимости  $P_H = f(k_H)$  для терригенных пород девона Туймазинского месторождения по параметру  $A_{да}$ . Растворы NaCl.

$a - C_B = 3,9$  н.;  $b - C_B = 0,04$  н.

1 —  $A_{да} < 3$  мс; 2 —  $3$  мс  $< A_{да} < 10$  мс; 3 —  $A_{да} > 10$  мс.



связи параметров  $P_{\Pi}$  и  $k_{\Pi}$  играет не меньшую роль, чем разнообразие в геометрии пор. Следовательно, при насыщении образцов раствором высокой минерализации ( $C_v \geq 4$  н.) — условие, при котором обычно получают эталонную связь  $P_{\Pi} = f(k_{\Pi})$ , — влияние проводимости двойного слоя не только не сводится к нулю, а напротив становится

даже несколько заметнее, чем при  $C_v \approx 0,1-1$  н.

Для расчленения корреляционной связи  $P_{\Pi}$  и  $k_{\Pi}$  удобнее использовать параметр  $A_{\text{да}}$ , поскольку он связан с показаниями на диаграммах  $U_{\text{сп}}$  в скважине. Примеры такой дифференциации экспериментальных точек для рассмотренных выше образцов песчаников и алевролитов приведены на рис. 41, а, б.

Отчетливая дифференциация по величине параметра  $A_{\text{да}}$  наблюдается также при анализе связи  $P_{\Pi}$  и  $k_{\Pi}$  для карбонатных пород с различной относительной глинистостью при насыщении образцов пресным раствором (рис. 42).

Таким образом, дифференциация корреляционной связи параметра пористости с коэффициентом пористости по параметру  $A_{\text{да}}$  позволяет в пределах отдельных групп всей совокупности точек

Рис. 42. Дифференциация сопоставления параметров  $P_{\Pi}$  и  $k_{\Pi}$  по величине  $A_{\text{да}}$  для известняков верхнего мела Крыма (по Б. Ю. Вендельштейну и В. С. Кудрявцеву).

Растворы NaCl,  $C_v = 0,03$  н.

1 —  $A_{\text{да}} < 36$  мв;  $E'_s > 0,35$ ; 2 —  $36$  мв  $< A_{\text{да}} < 44$  мв;  $0,2 < E'_s < 0,35$ ; 3 —  $E'_s < 0,2$ ;  $A_{\text{да}} > 44$  мв.

получить зависимости с меньшей дисперсией и повысить точность определения одного из параметров ( $P_{\Pi}$  или  $k_{\Pi}$ ) по известной величине другого.

Естественно, что дифференциация связи величин  $P_{\Pi}$  и  $k_{\Pi}$  по параметру  $A_{\text{да}}$  отражает влияние на характер этой связи относительной глинистости, приведенной емкости поглощения или параметра  $a$ .

В заключение отметим, что параметры  $A_{\text{да}}$ ,  $\Pi$  и  $q_{\Pi}$  примерно равноценны при характеристике адсорбционных свойств породы и любой из них можно использовать в соответствующем случае для этой цели.

### § 13. ПОТЕНЦИАЛЫ ФИЛЬТРАЦИИ

При фильтрации раствора электролита через капилляр одновременно со свободным раствором, заполняющим среднюю часть капилляра, в направлении течения перемещается и подвижная часть диффузной обкладки двойного электрического слоя. Это приводит к возникновению электрического тока в капилляре и появлению на концах его разности потенциалов  $E_{\phi}$ . Если толщина двойного слоя  $\delta$  мала по сравнению с радиусом капилляра  $r$ , величина  $E_{\phi}$  определяется формулой Гельмгольца [82]:

$$E_{\phi} = \frac{\epsilon \zeta Q_{\phi}}{4\pi\mu} \Delta p, \quad (115)$$

где  $\epsilon$ ,  $Q_{\phi}$ ,  $\mu$  — диэлектрическая проницаемость, удельное сопротивление и вязкость жидкости в капилляре;  $\zeta$  — электрокинетический потенциал;  $\Delta p$  — разность давлений между концами капилляра, под влиянием которой происходит фильтрация.

При выводе формулы (115) сделаны следующие допущения.

1. Течение жидкости в капилляре ламинарное. Скорость течения изменяется с расстоянием от оси капилляра по параболическому закону.

2. Поскольку  $\delta \ll r$ , величина  $\zeta$  может быть найдена из формулы, определяющей емкость плоского конденсатора. По этой же причине считают, что фильтрующаяся жидкость заполняет весь объем капилляра, в связи с чем при расчете  $E_{\phi}$  учитывают значения параметров  $\epsilon$ ,  $Q_{\phi}$ ,  $\mu$  только для этой жидкости.

3. Поверхностная проводимость отсутствует.

При прочих постоянных условиях в соответствии с формулой (115) потенциал фильтрации линейно зависит от перепада давлений  $\Delta p$  и удельного сопротивления жидкости  $Q_{\phi}$ . С увеличением минерализации раствора  $E_{\phi}$  уменьшается вследствие снижения величин  $Q_{\phi}$  и  $\zeta$ .

Знак фильтрационной э. д. с. определяется, исходя из следующего: при отрицательном  $\zeta$ -потенциале потенциал  $U_1$  места входа жидкости в капилляр ниже потенциала места выхода  $U_2$ . Обратное соотношение этих величин имеет место при положительном  $\zeta$ -потенциале. Таким образом, разность потенциалов  $U_1 - U_2$  имеет тот же знак, что и  $\zeta$ -потенциал. При обращении знака  $\zeta$ -потенциала изменится знак фильтрационной э. д. с.

Формула (115) позволяет вычислить величину  $E_{\phi}$  для заданного перепада давлений с учетом характеристик двойного слоя плоской поверхности и фильтрующейся жидкости. Характерно, что величина  $E_{\phi}$  не зависит от расхода жидкости, т. е. от интенсивности фильтрации.

Величина  $E_{\phi}$ , наблюдаемая в случае, когда значения  $r$  и  $\delta$  измеримы, отличается от вычисленной по формуле (115). Заметим, что приближение значения  $\delta$  к  $r$  может наблюдаться:

1) с переходом к более пресным растворам при  $r = \text{const}$ ;

2) с уменьшением радиуса капилляра при неизменной минерализации и составе раствора.

Более интересным для практики является второй случай. Рассмотрим, как изменяются условия по сравнению с исходными положениями Гельмгольца при уменьшении радиуса капилляра. Величины  $\delta$  и  $r$  становятся соизмеримыми, следовательно, при выводе формулы (115):

1) нельзя пренебречь величиной  $\delta$  по сравнению с  $r$ ;

2) нельзя применять формулу потенциала, полученную из выражения для емкости плоского конденсатора;

3) необходимо учесть отличие параметров  $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\rho$  в пределах подвижной части двойного слоя от их значений в свободном растворе;

4) следует иметь в виду сжатие диффузной части двойного слоя и соответствующее ему уменьшение  $\zeta$ -потенциала при прочих равных условиях за счет электростатического взаимодействия одноименных ионов внешней обкладки двойного слоя.

Учет влияния толщины двойного слоя и его цилиндрической формы можно выполнить, используя формулу Булла и Мойера [82]:

$$\zeta = \zeta_0 \frac{r}{\delta} \ln \left( 1 + \frac{\delta}{r} \right). \quad (116)$$

Здесь  $\zeta_0$  — электрокинетический потенциал плоской стенки, наблюдаемый в капилляре при  $\delta \ll r$ ;  $\zeta$  — значение его в узком капилляре. Нетрудно показать, что при  $\delta \rightarrow 0$  множитель при  $\zeta_0$  стремится к единице и  $\zeta \rightarrow \zeta_0$ .

Формула (116) выведена с использованием выражения для емкости плоского конденсатора. Подставляя выражение (116) для  $\zeta$  в формулу (115), получим:

$$E_{\phi} = \frac{\epsilon \zeta_0 Q_{\text{в}}}{4\pi\mu} \ln \left( 1 + \frac{\delta}{r} \right) \Delta p \frac{r}{\delta}. \quad (117)$$

В соответствии с (117) величина  $E_{\phi}$  при прочих постоянных условиях уменьшается с приближением величины  $\delta$  к  $r$ .

Для учета сжатия двойного слоя в тонких капиллярах в формуле (117) можно рассматривать  $\delta$  как функцию  $r$  в соответствии с формулой (23).

С увеличением доли объема капилляра, занимаемой двойным слоем, все более существенным будет влияние различия в значениях диэлектрической проницаемости и вязкости диффузной части двойного слоя и свободного раствора. Величина  $\epsilon$  в двойном слое, как уже указывалось, составляет от 2 до 10 (в относительных единицах) [56, 82]. Величина  $\mu$  для подвижной части двойного слоя выше, чем в свободном растворе. Таким образом, увеличение доли двойного слоя в объеме капилляра приведет к уменьшению среднего значения  $\epsilon$  и увеличению среднего значения  $\mu$  для всего объема и в результате к снижению фильтрационной э. д. с.

Влияние перечисленных факторов сводится к тому, что с уменьшением радиуса капилляра при неизменных  $\delta$ ,  $q_v$  и  $\Delta p$  произойдет закономерное снижение фильтрационной э. д. с.

Рассмотренные особенности фильтрационной э. д. с., возникающие при наличии перепада давлений на единичном капилляре, сохраняются и для простейшей модели пористой среды — идеального грунта, состоящего из системы параллельных капилляров одинакового сечения. Для более сложной модели, поры которой представлены параллельными капиллярами различного радиуса, величина фильтрационной э. д. с. при неизменных параметрах  $\mu$ ,  $\varepsilon$ ,  $q_v$  фильтрующейся жидкости будет определяться относительным вкладом капилляров с различным радиусом; очевидно, что чем больше будет тонких капилляров ( $\delta$  и  $r$  соизмеримы), тем больше будет снижаться величина  $E_\phi$  по сравнению со значением, рассчитываемым по формуле (115).

Горные породы имеют значительно более сложную геометрию, чем капилляры. Поровые каналы их извилисты и характеризуются резким изменением сечения вдоль оси канала. Это усложняет процесс фильтрации и при определенных перепадах давления  $\Delta p$  приведет к переходу ламинарного течения в турбулентное. Влияние формы поровых каналов и режима фильтрации на величину  $E_\phi$  не исследовалось. Можно предположить, что основную роль в формировании э. д. с. фильтрации будут играть параметры фильтрующейся жидкости, величина  $\zeta$ , перепад давления и радиус капилляров; роль режима фильтрации и геометрии поровых каналов, по-видимому, является второстепенной.

Экспериментальное изучение фильтрационных э. д. с., выполненное в различное время на реальных объектах рядом исследователей [1, 65, 67, 82, 89, 94], позволяет отметить следующие основные закономерности в поведении этих э. д. с., находящие в большинстве случаев удовлетворительное объяснение с точки зрения изложенного выше.

Для искусственных порошкообразных и естественных сцементированных образцов, не содержащих глинистого и другого высокодисперсного материала, величина  $E_\phi$  изменяется пропорционально значениям  $q_v$  и  $\Delta p$  и слабо зависит от степени дисперсности зерен минерального скелета и структурных характеристик образца — проницаемости и пористости [1, 82, 89].

Для таких объектов величину  $E_\phi$  можно выразить формулой [1, 69, 87]:

$$E_\phi = A_\phi \Delta p q_v. \quad (118)$$

Коэффициент  $A_\phi$  можно рассматривать как фильтрационную активность породы, которая определяется разностью потенциалов, возникающей при фильтрации воды с удельным сопротивлением  $q_v = 1 \text{ ом} \cdot \text{м}$  (при  $t = 18^\circ \text{C}$ ) под давлением в  $1 \text{ ат}$  [28].

Существенное снижение величины  $E_\phi$  по сравнению с предельным значением происходит в диафрагмах с тонкими капилля-

рами ( $r \leq 2$  мк при  $C_B > 0,01$  н. [82]) или в образцах, содержащих глинистый материал и характеризующихся некоторой конечной величиной приведенной емкости поглощения  $q_{\Pi}$  (рис. 43, 45, а).

Напомним, что:

$$q_{\Pi} = \frac{\sigma S_0}{k_{\Pi}}. \quad (119)$$

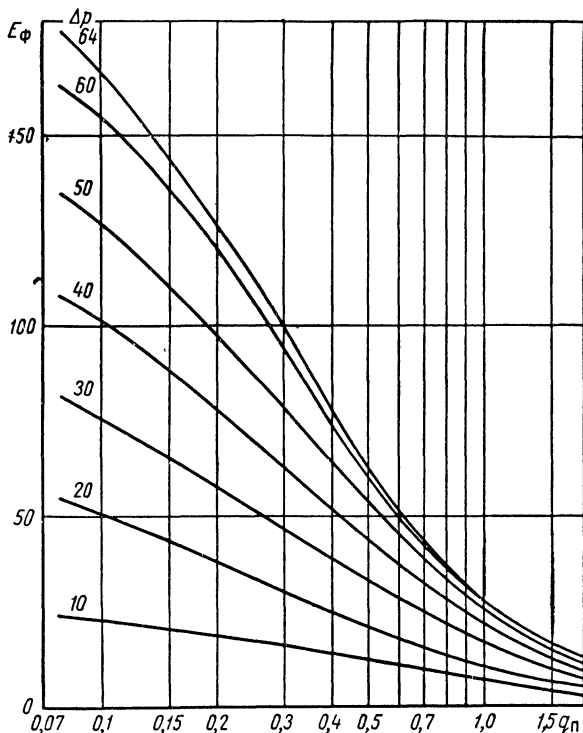


Рис. 43. Зависимости  $E_{\phi} = f(q)$  (составлены по данным [89]).

Шифр кривых —  $\Delta p$ ;  $Q_B = 1,5$  ам·м.

Для идеального грунта  $\frac{S_0}{k_{\Pi}} = \frac{2}{r}$  и  $q_{\Pi} = \frac{2\sigma}{r}$ . Следовательно, при  $\sigma = \text{const}$   $q_{\Pi}$  изменяется обратно пропорционально  $r$ .

Поскольку  $q_{\Pi}$  определяется в основном глинистостью, величина  $E_{\phi}$  при прочих постоянных условиях уменьшается с увеличением глинистости породы.

В глинах наблюдаются незначительные фильтрационные э. д. с., величина которых при постоянном  $\Delta p$  изменяется с ростом  $Q_B$  в области низких  $Q_B$  и при дальнейшем возрастании  $Q_B$  практически не меняется (рис. 44). Объясняется это, по-видимому, тем, что удельное

сопротивление поровых каналов в глинах при насыщении их пресными водами определяется в основном удельным сопротивлением двойного слоя и мало зависит от удельного сопротивления свободного раствора.

Зависимость  $E_\phi$  от  $q_v$  для глин описывается эмпирическим уравнением:

$$E_\phi = A_\phi q_v^m \Delta p \quad (120)$$

при  $A_\phi$ , изменяющемся в пределах  $0,15 \div 0,7$  и  $m = 0,3$  [69].

С переходом от глин к песчаникам, алевролитам и искусственным моделям пористой среды (фарфоровые диски и др.) с различным содержанием глинистого материала при прочих постоянных условиях

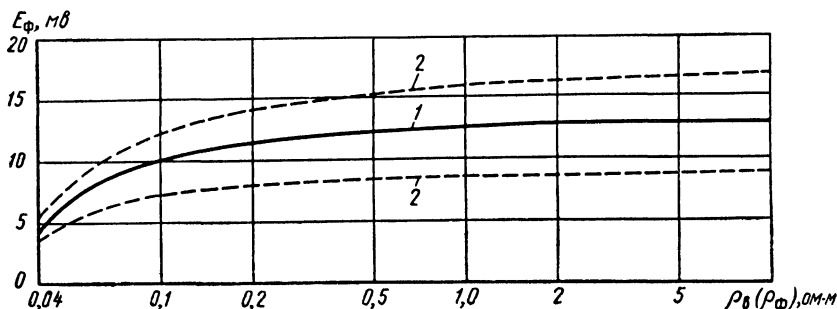


Рис. 44. Усредненная зависимость  $E_\phi = f(q_v)$  для глин (по Х. Хиллу и А. Андерсону).

1 — линия регрессии; 2 — границы области возможных зависимостей  $E_\phi = f(q_v)$  для различных глин.  $\Delta p = 63 \text{ ат}$ .

графики  $E_\phi = f(q_v)$  располагаются выше соответствующей зависимости для глин. Чем меньше глинистость породы, тем выше расположен график и слабее выполаживание его в области  $q_v > 0,5 \text{ ом} \cdot \text{м}$  (рис. 45, а).

По-видимому, формула (120) пригодна для описания графиков  $E_\phi = f(q_v)$ , если изменять в ней значение экспоненты  $m$ . С уменьшением емкости поглощения  $m$  возрастает, стремясь к единице при  $q_v$ , стремящейся к нулю.

На моделях глинистой корки в лабораторных условиях получены более высокие фильтрационные э. д. с., в среднем в 1,5—3 раза превышающие значения  $E_\phi$  для глин. Это вызвано тем, что при перепадах давлений  $\Delta p < 70 \text{ ат}$ , использованных для наблюдения фильтрационных э. д. с., глинистая корка имеет пористость более высокую и, следовательно, емкость поглощения более низкую, чем природные глины. Действительно, если в природных глинах и сильно глинистых алевролитах и песчаниках, слагающих разрезы нефтяных и газовых месторождений, величина  $q_{\text{н}}$  превышает  $1—1,5 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{сек}}{\text{см}^3}$ , то в глинистой корке, сложенной даже высокодисперс-

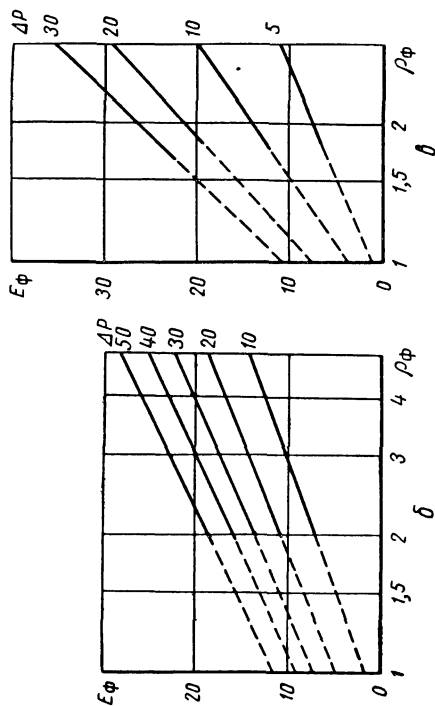
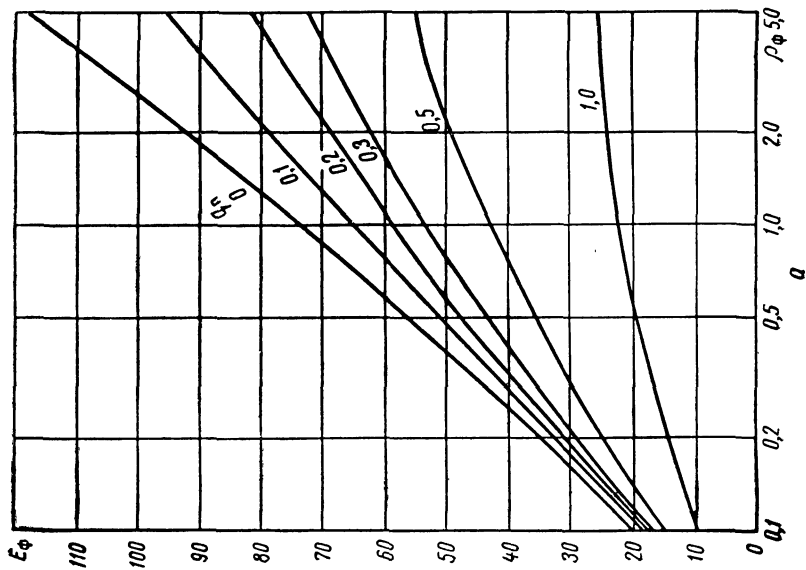


Рис. 45. Зависимости  $E_{\phi} = f(Q_{в})$ .

а — для терригенных пород, при  $\Delta p = 63 \text{ ат}$ ; шифр кривых —  $q_{д}$ ;  
 б, в — для глинистых пород, выделенных из обычного (б) и щелочного  
 (в) глинистых растворов; шифр кривых —  $\Delta p$  (составлено по данным  
 [89]).

ным глинистым материалом, при давлениях до 100 ат значение  $q$  будет меньше  $0,5 \frac{\text{мг-экв}}{\text{см}^3}$ .

Зависимости  $E_{\Phi} = f(q_v)$  при  $\Delta p = \text{const}$  для глинистых корок, выделенных из моделей различных глинистых растворов, различаются (рис. 45, б, в). Для всех характерно увеличение  $E_{\Phi}$  с ростом  $q_v$ .

Для одинаковых  $\Delta p = \text{const}$  наиболее низкие  $E_{\Phi}$  (рис. 45, б) наблюдаются на глинистой корке обычного глинистого раствора. Несколько выше значения  $E_{\Phi}$  для корки из слабо известкового раствора [89]. Наиболее высокие  $E_{\Phi}$  характеризуют корки из глинистых растворов, обработанных реагентом из каустической соды с органическими добавками и известковых растворов (рис. 45, в). По-видимому и здесь дело прежде всего в различии параметра  $q$  для различных типов глинистой корки.

Формулу (120) при  $q_v = \text{const}$  можно переписать в виде

$$E_{\Phi} = A_{\Phi} \Delta p, \quad (121)$$

где  $A_{\Phi}$  — постоянный для заданных условий коэффициент фильтрационной э. д. с.

Формула (121) применима для описания связи  $E_{\Phi} = f(\Delta p)$  только в породах, электрохимические свойства которых существенно не изменяются с увеличением  $\Delta p$ : неглинистые и слабо глинистые объекты, плотные цементированные глинистые породы. Для пород, уплотняющихся в процессе опыта, и особенно для глинистой корки, пористость которой существенно уменьшается с увеличением  $\Delta p$ , зависимость  $E_{\Phi} = f(\Delta p)$  удовлетворяет более общему эмпирическому уравнению [69, 94]:

$$E_{\Phi} = A_{\Phi} \Delta p^n, \quad (122)$$

частным случаем которого при  $n = 1$  будет формула (121). Графики на рис. 46 для различных глин и глинистых корок характеризуются значениями  $n < 1$  (1, 2) и  $n = 1$  (3, 4, 5).

При фильтрации жидкости через две последовательно расположенные среды с различными характеристиками величина общей э. д. с. фильтрации  $E_{\Phi}$  равна алгебраической сумме э. д. с., соответствующих первой  $E_{\Phi I}$  и второй  $E_{\Phi II}$  средам. Выражая  $E_{\Phi I}$  и  $E_{\Phi II}$  приближенной формулой (121), можно записать:

$$E_{\Phi} = A_{\Phi I} \Delta p_I + A_{\Phi II} \Delta p_{II}, \quad (123)$$

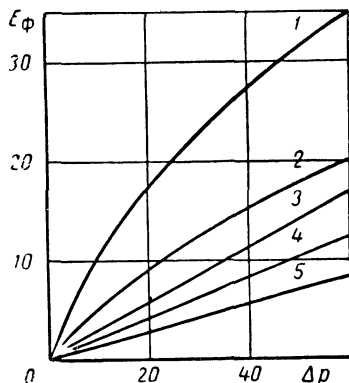


Рис. 46. Зависимости  $E_{\Phi} = f(\Delta p)$  для различных объектов (по данным [89]).

1, 2 — глинистые корки,  $q_v = 1,5 \text{ ом} \cdot \text{м}$ ; 3, 4, 5 — глины,  $q_v \geq 1 \text{ ом} \cdot \text{м}$ .



где  $A_{\phi I}$  и  $A_{\phi II}$  — коэффициенты фильтрационной э. д. с. соответствующих сред;  $\Delta p_I$  и  $\Delta p_{II}$  — перепады давления в этих средах. Сумма значений  $\Delta p_I$  и  $\Delta p_{II}$  составляет общий перепад давления  $\Delta p$ . Из гидродинамики известно, что для рассматриваемых условий при  $\Delta p = \text{const}$  значения  $\Delta p_I$  и  $\Delta p_{II}$  будут в обратной зависимости от коэффициентов проницаемости сред. Если проницаемости сред различаются очень существенно, например, проницаемость первой среды на два—три порядка ниже проницаемости второй, то  $\Delta p_I \gg \Delta p_{II}$ ,  $\Delta p_I \approx \Delta p$  и вторым слагаемым в формуле (123) можно пренебречь.

В этом случае  $E_{\phi} = A_{\phi I} \Delta p_I$  и величина  $E_{\phi}$  определяется только свойствами первой среды. Практическим примером является э. д. с. фильтрации, возникающая на глинистой корке, расположенной последовательно с коллектором при радиальной фильтрации; фильтрационная компонента  $E_{\phi}$  в этом случае практически определяется только свойствами глинистой корки. При отсутствии глинистой корки величина э. д. с. фильтрации будет определяться только свойствами породы. Чем менее глинистой является порода, тем выше будет величина  $E_{\phi}$ .

Резюмируем изложенное.

1. Основные закономерности, определяющие зависимость фильтрационной э. д. с. от параметров фильтрующейся жидкости и электрокинетических свойств поверхности твердой среды, качественно описываются уравнением Гельмгольца. Важнейшими свойствами фильтрационной э. д. с. в соответствии с этим уравнением являются пропорциональность величины  $E_{\phi}$  удельному сопротивлению жидкости  $\rho_v$  и перепаду давлений  $\Delta p$ . Для реальных пористых систем в общем случае зависимость  $E_{\phi}$  от  $\rho_v$  и  $\Delta p$  не будет линейной.

2. Фильтрационные э. д. с. в неоднородных пористых системах со средним радиусом пор более 1—2 мк при постоянных перепаде давлений, электропроводности, вязкости и диэлектрической проницаемости фильтрующейся жидкости зависят только от величины  $\zeta$ -потенциала. Следовательно, в этих условиях потенциалы фильтрации определяются химическим составом ионов свободного раствора и внешней обкладки двойного слоя так же, как  $\zeta$ -потенциал. Данной группе пористых систем соответствуют слабо глинистые и чистые песчаники и алевролиты, чистые известняки и доломиты. Очевидно, что при  $k_{пр} > 100$  мд связь между величинами  $E_{\phi}$  и  $k_{пр}$  в терригенных коллекторах с глинистым цементом отсутствует.

3. В породах со средним радиусом пор менее 1—2 мк величина  $E_{\phi}$  при прочих постоянных условиях закономерно уменьшается с увеличением глинистости. К таким породам относятся глинистые песчаники и алевролиты, а также глинистые известняки.

Наличие связи между величинами  $E_{\phi}$  и  $k_{пр}$  возможно в глинистых песчаниках и алевролитах [27], поскольку их проницаемость достаточно тесно связана с относительной глинистостью.

4. Величина  $E_{\phi}$  системы, состоящей из двух последовательно включенных пьезопроводностей, определяется в основном свойствами той среды, которая обладает меньшей проницаемостью, поскольку ей соответствует большая часть общего перепада давлений. В частности, при последовательном расположении на пути фильтрации глинистой корки и коллектора величина  $E_{\phi}$  определяется практически только фильтрационным потенциалом глинистой корки, поскольку проницаемость ее, как правило, на порядок или несколько порядков ниже проницаемости коллектора.

## § 14. ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ

Э. Д. С.

Окислительно-восстановительные э. д. с. возникают в результате различных окислительно-восстановительных процессов, протекающих на контакте материалов с электронной проводимостью с окружающей средой. К таким материалам относятся различные металлы, минералы и горные породы — пирит и другие сульфиды, магнетит, графит, антрациты и прочие виды сильно метаморфизованных углей. Окислительно-восстановительные процессы связаны с потерей электронов (окисление) или приобретением их (восстановление) веществом. Обычно эти процессы обусловлены различными химическими и электрохимическими реакциями. В последнем случае свободные электроны совершают определенный путь от участка, где происходит окисление, к участку, где протекает восстановление, что приводит к выделению электрической энергии помимо тепловой [39].

Рассмотрим наиболее типичные виды окислительно-восстановительных э. д. с.

### Электродные потенциалы

На границе металла с водным раствором происходит переход атомов металла в раствор в виде катионов при этом свободные электроны, сохраняясь в металле, сообщают его поверхности отрицательный заряд, а ионы металла заряжают раствор вблизи поверхности металла положительно. При этом между металлом и раствором возникает разность потенциалов, которую называют электродным потенциалом и вычисляют по формуле Нернста:

$$E_0 = \frac{RT}{zF} \ln \frac{p}{P} = \frac{RT}{zF} \ln \frac{c}{C}, \quad (124)$$

где  $p$  и  $c$  — осмотическое давление и концентрация ионов металла в растворе;  $P$  — электролитическая упругость растворения металла;  $C$  — концентрация ионов металла, соответствующая нормальному электродному потенциалу данного металла (рис. 47, а).

Интенсивность растворения металла будет тем больше, чем меньше концентрация ионов металла в растворе. Наименее

интенсивно металл растворяется, если он погружен в концентрированный раствор, содержащий ионы того же металла, при этом электродный потенциал является наиболее стабильным. Видоизменяя выражение (124), можно записать:

$$E_a = E_0 - \frac{RT}{zF} \ln a. \quad (125)$$

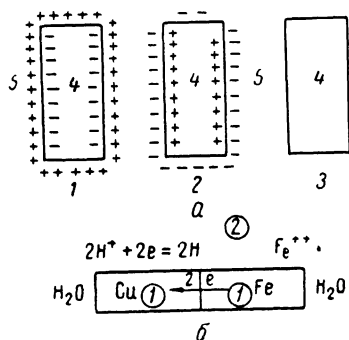
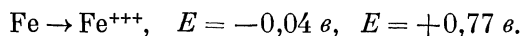
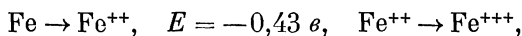


Рис. 47. Схемы образования окислительно - восстановительных потенциалов.

$a$  — электродные потенциалы: 1 —  $P > p$ , 2 —  $P < p$ , 3 —  $P = p$ , 4 — металл, 5 — раствор; б — потенциалы коррозии; цифры в кружках: 1 — металлы; 2 — раствор (по данным [39]).

Здесь  $a$  — активность ионов металла в растворе;  $E_0$  — нормальный электродный потенциал данного металла, измеренный при наличии в растворе ионов металла с активностью  $a = 1$  (табл. 5). Величину  $E_0$  определяют обычно, измеряя потенциал электрода из данного металла по отношению к нормальному водородному электроду.

Если металл электрода при растворении дает ионы различной валентности, возможны реакции следующего типа с образованием э. д. с.:



Если электроды из двух различных металлов соединены коротко и погружены в раствор электролита, вследствие различия в значениях  $E_0$  металлов эти электроды образуют гальванический элемент.

Таблица 5

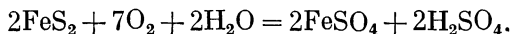
| Металл   | Ион               | $E_0$ , в |
|----------|-------------------|-----------|
| Натрий   | $\text{Na}^+$     | -2,71     |
| Магний   | $\text{Mg}^{++}$  | -2,38     |
| Алюминий | $\text{Al}^{+++}$ | -1,66     |
| Цинк     | $\text{Zn}^{++}$  | -0,76     |
| Железо   | $\text{Fe}^{++}$  | -0,43     |
| Свинец   | $\text{Pb}^{++}$  | -0,13     |
| Водород  | $\text{H}^+$      | 0         |
| Медь     | $\text{Cu}^{++}$  | +0,34     |
| Золото   | $\text{Au}^{++}$  | +1,70     |

Образование гальванической пары порождает э. д. с., величина которой определяется разностью электродных потенциалов, вычисленных по формуле (124), при этом происходит разрушение (коррозия) металла, которому соответствует более отрицательное значение  $E$  [39] (рис. 47, б).

## Окислительно-восстановительные химические реакции

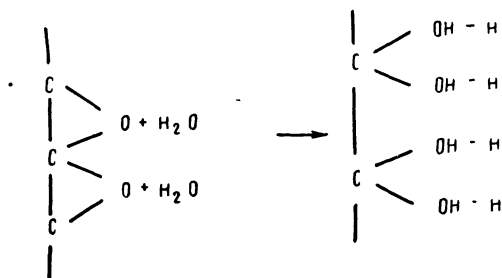
Различные горные породы: сульфиды, железные руды, графит, антрацит и каменные угли — подвергаются окислительно-восстановительным реакциям в условиях их естественного залегания и на границе со скважиной — при вскрытии. Вид этих реакций определяется вещественным составом породы, содержанием кислорода в окружающей среде, водородным показателем pH и окислительно-восстановительным фактором Eh, температурой, химическим составом пластовых вод, бурового раствора и вмещающих пород.

Окислительно-восстановительные реакции также приводят к появлению электрического заряда на поверхности породы. Примером окислительной реакции является взаимодействие пирита с водой и растворенным в ней кислородом [28]:



Пирит адсорбирует из раствора анионы железа и приобретает положительный заряд, что вызывает образование слоя катионов раствора близ поверхности пирита.

Окисление углей по Шилову в водной среде происходит по схеме [28]:



Поверхность угля приобретает отрицательный заряд, а раствор близ поверхности — положительный.

При протекании восстановительных реакций поверхность твердой фазы заряжается положительно, а раствор — отрицательно.

Работами В. Н. Дахнова было показано, что особенно интенсивные электрические поля в углях возникают при наличии в растворах, соприкасающихся с образцом угля, окислителей  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{KMnO}_4$  [31]. Увеличение концентрации окислителей приводит при прочих равных условиях к резкому возрастанию окислительно-восстановительных потенциалов. Эти исследования позволяют предположить в качестве одного из возможных путей характеристики окислительно-восстановительной активности породы определение э. д. с. окислительно-восстановительного происхождения при определенной стандартной концентрации окислителей в растворах. Одновременно эти исследования явились физическим обоснованием

возможности создания искусственных полей окислительно-восстановительного происхождения в скважине с целью выделения в разрезе полезных ископаемых, способных вступать в окислительно-восстановительные реакции.

### Выводы

Естественные электрические поля в скважинах создаются при диффузии электролитов, фильтрации жидкостей и окислительно-восстановительных процессах. Потенциалы, возникающие в результате этих процессов, в зависимости от их происхождения относятся соответственно к диффузионным, фильтрационным и окислительно-восстановительным.

Основы теории диффузионных, фильтрационных и окислительно-восстановительных потенциалов разработаны в теоретической электрохимии. Природа диффузионных и диффузионно-адсорбционных, а также фильтрационных потенциалов тесно связана с электрокинетическими явлениями в капиллярных системах, жесткая матрица которых представлена материалом — диэлектриком. Окислительно-восстановительные э. д. с., как правило, связаны с материалами, имеющими электронную проводимость; э. д. с. такого происхождения рассматриваются в работах по теории коррозии и электродных процессов.

По данным обширных исследований, выполненных геофизиками, главными факторами, определяющими значения диффузионных и фильтрационных э. д. с., являются адсорбционная способность (степень дисперсности) породы, минерализация и химический состав растворов.

Величина диффузионных и фильтрационных э. д. с. в той или иной степени связана с коллекторскими свойствами породы, что предопределяет практическую значимость метода потенциалов собственной поляризации в комплексе геофизических методов исследования нефтяных и газовых скважин.

---

## ПОТЕНЦИАЛЫ СОБСТВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД В СКВАЖИНАХ

При проведении электрометрии скважин одновременно с диаграммой кажущихся сопротивлений регистрируют кривую изменения по разрезу скважины потенциала  $U_{\text{СП}}$  электрического поля, созданного собственной поляризацией горных пород. Регистрация кривой  $U_{\text{СП}}$  проводится по схеме измерения разности потенциалов между электродом  $M$ , перемещающимся по скважине, и электродом  $N$ , расположенным неподвижно на поверхности вблизи устья скважины (рис. 48, а). Измерительным прибором является потенциометр или гальванометр.

Регистрируемая разность потенциалов  $\Delta U_{MN}$  состоит из следующих компонент:

$$\begin{aligned}\Delta U_{MN} &= U_{\text{СП}} = U_{\text{эМ}} + U_{\text{эН}} + U_M + U_N + \\ &+ \Delta U_{MN}^{\tau} \approx U_M + \text{const},\end{aligned}\quad (126)$$

где  $U_{\text{эМ}}$  и  $U_{\text{эН}}$  — электродные потенциалы электродов  $M$  и  $N$ ;  $U_M$  — потенциал естественного электрического поля скважины в точке  $M$ ;  $U_N$  — потенциал естественного электрического поля в точке, где расположен электрод  $N$ ;  $\Delta U_{MN}^{\tau}$  — разность потенциалов между электродами  $M$  и  $N$ , обусловленная изменяющимися во времени теллурическими и блуждающими токами.

При благоприятных условиях величина  $\Delta U_{MN}^{\tau}$  мала по сравнению с другими слагаемыми и ею можно пренебречь; значения электродных потенциалов  $U_{\text{эМ}}$  и  $U_{\text{эН}}$  незначительно изменяются в процессе замера так же, как и величина  $U_N$ , если электроды

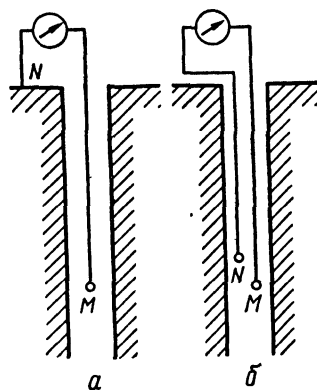


Рис. 48. Схема измерения.  
а — потенциала  $U_{\text{СП}}$ ; б — градиента потенциала  $U_{\text{СП}}$ .

неполяризующиеся и электрод  $N$  помещен в стабильные условия, например, находится в мернике с глинистым раствором. При этих условиях разность потенциалов  $\Delta U_{MN}$  будет отличаться на постоянное слагаемое от величины  $U_M$ , и кривая изменения ее по скважине будет идентична кривой  $U_M$ . Отсюда следует, что кривая  $U_{СП}$  является кривой относительного изменения потенциала по скважине, не имеющей нулевой линии для потенциала  $U_M$ . При регистрации диаграммы  $U_{СП}$  необходимо соблюдать условие постоянства суммы величин  $U_{\partial M} + U_{\partial N} + U_N + \Delta U_{MN}^r$ .

Если «электрод сравнения»  $N$  поместить в скважине рядом с электродом  $M$ , то получаем схему измерения градиента потенциала естественного электрического поля. Регистрация кривой градиента  $U_{СП}$  (рис. 48, б) производится при детальных исследованиях отдельных участков разреза рудных и угольных скважин, а также при наличии искажающего влияния теллурических и блуждающих токов. В последнем случае величина  $\Delta U_{MN}^r$ , примерно пропорциональная расстоянию  $\overline{MN}$ , резко уменьшается с сокращением  $MN$  до долей метра.

Задачи теории метода потенциалов собственной поляризации заключаются в изучении электрического поля, возникающего при поляризации горных пород в скважине, и разработке способов перехода от наблюдаемых значений  $U_{СП}$  к истинным параметрам, характеризующим электрохимическую активность породы в условиях ее естественного залегания.

## § 15. ЕСТЕСТВЕННОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В СКВАЖИНЕ

Естественное электрическое поле в скважине создается благодаря возникновению двойных электрических слоев на границе скважины с породами, слагающими разрез скважины, и на границах между пластами с различной литологией. Двойные слои образуются в результате диффузии электролитов, фильтрации растворов электролитов и окислительно-восстановительных процессов. Главная роль среди указанных процессов принадлежит диффузии электролитов, поэтому характер изменения потенциала естественного электрического поля по скважине определяется в основном э. д. с. диффузионного происхождения. Фильтрационные и окислительно-восстановительные э. д. с. могут вызвать некоторые изменения кривой  $U_{СП}$  на отдельных участках разреза, но в целом распределение потенциалов по оси скважины остается постоянным.

## Статическая амплитуда $E_s$ потенциалов собственной поляризации

Пусть чистый неглинистый пласт песчаника или известняка залегает в толще глин (рис. 49). Допустим, что скачки потенциала в двойных слоях имеют только диффузионное происхождение. Если скважина заполнена пресным буровым раствором, а породы насыщены минерализованной водой, то на границе скважины с глиной возникнут диффузионно-адсорбционные э. д. с.  $E_{0,3}$  и  $E_{0,1}$ , причем обкладка двойного слоя, расположенного в скважине против глин,

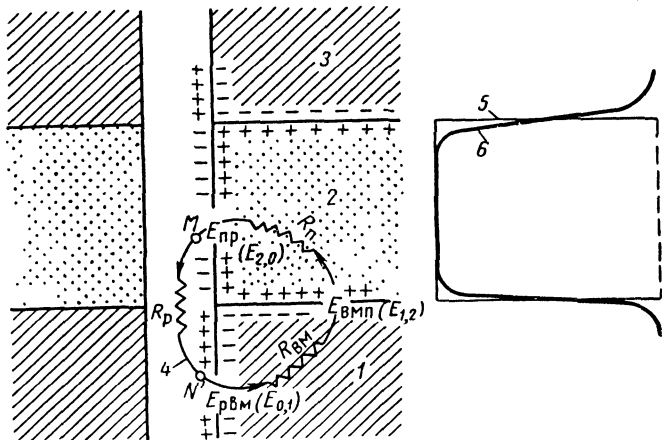


Рис. 49. К понятию статической амплитуды  $U_{СП}$ .

1, 3 — вмещающие породы; 2 — пласт-коллектор; 4 — замкнутый электрический контур — аналог цепи токов СП; 5 — график статических потенциалов СП; 6 — график фактических потенциалов СП по оси скважины.

будет положительной. При одинаковой адсорбционной способности и минерализации вод в глинах, покрывающих и подстилающих пласт,  $E_{0,3} = E_{0,1}$ . Границе пласта песчаника со скважиной соответствует диффузионная э. д. с.  $E_{2,0}$ , обусловленная различием концентрации растворов в скважине и пласте; против песчаника скважина заряжена отрицательно.

На границах пласта с глинами даже при одинаковой минерализации вод в песчанике и глинах возникнут э. д. с.  $E_{3,2}$  и  $E_{1,2}$ , обусловленные различием адсорбционных свойств контактирующих сред. Величина их определяется значением фазового граничного потенциала (гл. I, § 9). Положительная обкладка соответствующих двойных слоев расположена в пласте.

Рассмотрим замкнутый электрический контур, составленный из последовательно включенных э. д. с.  $E_{0,1}$ ,  $E_{1,2}$ ,  $E_{2,0}$ . Цифры 0, 1, 2 обозначают соответственно скважину, глину, пласт; последовательность цифр в индексах при  $E$  отражает порядок встречи





**Фактическая амплитуда  $\Delta U_{\text{СП}}$  и связь ее со статической амплитудой**

Рассмотрим теперь контур, содержащий э. д. с.  $E_{\text{РВМ}}$ ,  $E_{\text{ВМП}}$ ,  $E_{\text{ПР}}$ , при условии, что в нем течет постоянный ток  $I$ . Омическое сопротивление участков цепи, расположенных в скважине, вмещающих породах и пласте, обозначим  $R_{\text{Р}}$ ,  $R_{\text{ВМ}}$ ,  $R_{\text{П}}$  [36]. По второму закону Кирхгофа:

$$I(R_{\text{Р}} + R_{\text{П}} + R_{\text{ВМ}}) = E_{\text{РВМ}} + E_{\text{ВМП}} + E_{\text{ПР}}. \quad (128)$$

Изменение потенциала по контуру характеризуется теперь не только скачками значений  $U$  на границах, но и плавным изменением  $U$  при движении по каждой из сред (рис. 50). Разность потенциалов между точками  $M$  и  $M'$  определяется произведением силы тока  $I$  на сопротивление участка цепи между  $M$  и  $M'$ . Если между  $M$  и  $M'$  полностью включен участок скважины с сопротивлением  $R_{\text{Р}}$ , разность потенциалов  $\Delta U_{\text{ММ}'} = IR_{\text{Р}}$  соответствует полному изменению потенциала в скважине при переходе из части скважины, окруженной вмещающими породами, в часть скважины, находящейся в пласте. Учитывая равенства (127) и (128), получим:

$$\Delta U_{\text{ММ}'} = E_{\text{с}} - I(R_{\text{П}} + R_{\text{ВМ}}). \quad (129)$$

Величина  $\Delta U_{\text{ММ}'}$  является фактической амплитудой аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  в пласте. Эта амплитуда в общем случае не равна статической, отличается от нее на величину  $I(R_{\text{П}} + R_{\text{ВМ}})$ . В электрически однородной среде ( $q_{\text{Р}} = q_{\text{П}} = q_{\text{ВМ}}$ )<sup>1</sup> при большой мощности пласта значением  $I(R_{\text{П}} + R_{\text{ВМ}})$  можно пренебречь по сравнению с  $IR_{\text{Р}}$ . Это ясно из следующего рассуждения. Для каждой из сред величину  $R$  можно представить как произведение коэффициента  $k$ , отражающего геометрию среды, на удельное сопротивление среды  $q$ :

$$R = kq.$$

По аналогии с формулой для линейных проводников  $k$  можно выразить отношением эффективных значений длины  $l_{\text{э}}$  и сечения  $S_{\text{э}}$  для каждой среды:

$$k = \frac{l_{\text{э}}}{S_{\text{э}}}.$$

При одинаковых  $qR_0 \gg R_2 + R_3$ , так как коэффициент геометрии среды  $k_0$  для скважин будет намного больше значений  $k_{\text{ВМ}}$  и  $k_{\text{П}}$ , поскольку «эффективное сечение»  $S_{\text{э}3}$  и  $S_{\text{э}2}$  огромно по сравнению со значением  $S_{\text{э}0}$  для скважины. При этих условиях  $\Delta U_{\text{СП}} \approx E_{\text{с}}$  (рис. 49).

Величина  $I(R_{\text{П}} + R_{\text{ВМ}})$  становится соизмеримой с  $IR_0$ , когда  $q_{\text{П}}$  и  $q_{\text{ВМ}}$  значительно превосходят  $q_0$  или при небольшой мощности пласта, так как в этом случае «фактор геометрии среды»  $k_{\text{П}}$  пласта

<sup>1</sup> При ознакомлении с изложенным ниже следует иметь в виду, что  $q_{\text{ВМ}} \equiv q_1 \equiv q_3$ ,  $q_2 \equiv q_{\text{П}}$ .

становится соизмеримым с значением этого фактора для скважины. В каждом из этих случаев величиной  $I(R_{\Pi} + R_{\text{ВМ}})$  пренебрегать нельзя и она явится причиной отличия наблюдаемой скважины амплитуды  $\Delta U_{\text{СП}}$  от статической  $E_s$ . Очевидно, наиболее существенно  $\Delta U_{\text{СП}}$  будет отличаться от  $E_s$  при одновременном действии указанных факторов: небольшой мощности пласта и различии в удельном сопротивлении скважины  $\varrho_p$  и пород  $\varrho_{\Pi}$  ( $\varrho_p < \varrho_{\Pi}$ ).

Влияние «геометрического» и «омического» факторов на величину  $\Delta U_{\text{СП}}$  можно учесть, применив теорию поля естественных потенциалов в скважине.

## § 16. ТЕОРИЯ ПОЛЯ ДВОЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ В СКВАЖИНЕ

### Однородная среда

Задача о потенциале поля двойных электрических слоев для однородной среды ( $\varrho_p = \varrho_2 = \varrho_3 = \varrho_1$ ) в случае скважины была решена Л. М. Альпиным и С. М. Шейнманом [3].

Из теории поля известно [72], что потенциал  $U_M$  поля однородного двойного электрического слоя в точке  $M$  определяется выражением:

$$U_M = \tau \Omega, \quad (130)$$

где  $\Omega$  — телесный угол видимости двойного слоя из этой точки;  $\tau$  — момент двойного слоя.

Поскольку момент  $\tau$  связан со скачком  $E$  потенциала двойного слоя соотношением

$$\tau = \frac{E}{4\pi},$$

то

$$U = \frac{\Omega}{4\pi} E. \quad (131)$$

Используя свойство суперпозиции полей, потенциал пяти двойных слоев (рис. 51) в точке  $M$ , расположенной на оси скважины,

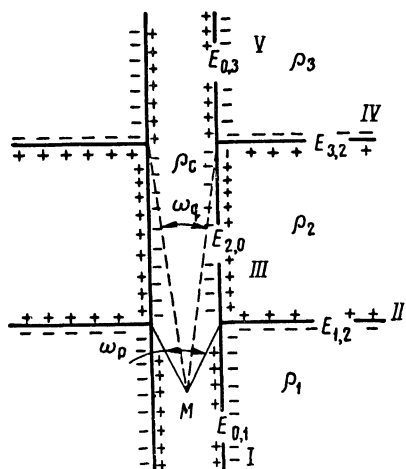


Рис. 51. К выводу уравнения (136).

будет равен сумме потенциалов, создаваемых каждым слоем в отдельности:

$$U_M = U_I + U_{II} + U_{III} + U_{IV} + U_V. \quad (132)$$

Совместим ось  $z$  с осью скважины и начало координат с точкой пересечения оси плоскостью, ей перпендикулярной и проходящей через

середину пласта. За положительное направление оси  $z$  примем направление вниз.

Обозначив через  $\omega_p$  и  $\omega_q$  телесные углы видимости из точки  $M$  круглых сечений скважиной плоских границ кровли и подошвы пласта, составим выражения для отдельных слагаемых суммы (132):

$$\begin{aligned} U_I &= \frac{\omega_q}{4\pi} E_{0,3}, & U_{II} &= \frac{2\pi - \omega_q}{4\pi} E_{2,3}, \\ U_{III} &= \frac{\omega_p - \omega_q}{4\pi} E_{0,2}, & U_{IV} &= \frac{2\pi - \omega_p}{4\pi} E_{1,2}, \\ U_V &= \frac{4\pi - \omega_p}{4\pi} E_{0,1}. \end{aligned} \quad (133)$$

Здесь  $E_{0,3}$ ,  $E_{3,2}$ ,  $E_{0,2}$ ,  $E_{0,1}$ ,  $E_{1,2}$  — значения скачков потенциала.

Вычислим  $U_M$ , учитывая, что  $E_{0,2} = -E_{2,0}$ ,  $E_{2,3} = -E_{3,2}$  и полагая  $E_{0,3} = E_{0,1} = E_{p \text{ в м}}$  и  $E_{3,2} = E_{1,2} = E_{\text{в м п}}$ :

$$\begin{aligned} U_M &= \frac{\omega_q}{4\pi} E_{0,3} - \frac{2\pi - \omega_q}{4\pi} E_{3,2} + \frac{\omega_p - \omega_q}{4\pi} E_{0,2} + \frac{2\pi - \omega_p}{4\pi} E_{1,2} + \\ &+ \frac{4\pi - \omega_p}{4\pi} E_{0,1} = \frac{1}{4\pi} [(4\pi - \omega_p + \omega_q) E_{p \text{ в м}} - (\omega_p - \omega_q) E_{\text{в м п}} + \\ &+ (\omega_p - \omega_q) E_{\text{п п}}] = E_{p \text{ в м}} - \frac{\omega_p - \omega_q}{4\pi} (E_{p \text{ в м}} + E_{\text{в м п}} + E_{\text{п п}}). \end{aligned} \quad (134)$$

Но так как

$$\begin{aligned} \omega_p &= 2\pi \left\{ 1 - \frac{z - \frac{h}{2}}{\sqrt{\left(\frac{d_c}{2}\right)^2 + \left(z - \frac{h}{2}\right)^2}} \right\}, \\ \omega_q &= 2\pi \left\{ 1 - \frac{z + \frac{h}{2}}{\sqrt{\left(\frac{d_c}{2}\right)^2 + \left(z + \frac{h}{2}\right)^2}} \right\}, \end{aligned} \quad (135)$$

где  $d_c$  — диаметр скважины;  $h$  — мощность пласта, то, подставляя значения  $\omega_p$  и  $\omega_q$  в формулу (134), выражая  $z$  и  $h$  в единицах  $d_c$

$$h_d = \frac{h}{d_c}, \quad z_d = \frac{z}{d_c}$$

и учитывая (127), получим:

$$U_M = E_{0,1} - \left[ \frac{2z_d - h_d}{\sqrt{1 + (2z_d - h_d)^2}} - \frac{2z_d + h_d}{\sqrt{(2z_d + h_d)^2 + 1}} \right] \frac{E_s}{2}. \quad (136)$$

Выражение (136) позволяет вычислить отклонение величины  $U_M$  от значения скачка  $E_{p \text{ в м}}$  потенциала на границе скважина — вмещающие породы («линия глины») при пересечении пласта по оси скважины. Степень отклонения определяется величиной статической

амплитуды  $E_s$  и «геометрического фактора» (выражение в квадратных скобках). Влияние последнего зависит от соотношения между мощностью пласта и диаметром скважины.

Исследуем выражение (136).

1. На большом расстоянии выше или ниже пласта  $z_d \gg h_d$  и  $U_M = E_{p\text{ в м}}$ .

2. В середине мощного пласта при  $z_d = 0$ ,  $h_d > 4$

$$U_M = E_{p\text{ в м}} + E_s.$$

3. На границах мощного пласта при  $z_d = \frac{h_d}{2}$  и  $h_d > 4$

$$U_M = E_{p\text{ в м}} + \frac{E_s}{2}.$$

Выражения  $U_M$  для рассмотренных характерных случаев и расчет кривой  $U_M = f(z_d)$  по формуле (136) (рис. 52) позволяют отметить следующие особенности кривой  $U_{\text{СП}}$  в одиночном пласте.

1. Если скачки потенциала одинаковы на границе со скважиной пород, покрывающих и подстилающих пласт, а также в кровле и подошве пласта, аномалия в пласте симметрична относительно его середины, так как выражение в квадратных скобках в формуле (136) — четная функция  $z_d$ .

Отклонение кривой  $U_{\text{СП}}$  в пласте от «линии глин» происходит в сторону уменьшения потенциала, если скважина заряжена отрицательно против пласта, и в сторону увеличения, если она заряжена положительно.

2. В пластах с относительной мощностью  $h_d > 4$  амплитуда фактической аномалии  $U_{\text{СП}}$  практически не отличается от статического значения  $E_s$ . При  $h_d < 4$   $\Delta U_{\text{СП}} < E_s$ , причем отличие тем больше, чем меньше  $h_d$ .

Интегрирование выражения (136) по  $z_d$  в пределах между нулем и бесконечностью показывает, что с уменьшением  $h_d$  площадь, ограниченная кривой  $U_{\text{СП}} = f(z_d)$  и линией глин в указанном диапазоне  $z_d$ , остается неизменной, равной площади  $S$  статической аномалии  $U_{\text{СП}}$  [29], причем:

$$S = E_s h. \quad (137)$$

Пользуясь этим свойством, можно по площади, ограниченной кривой  $U_{\text{СП}}$ , зная  $h_d$ , вычислить статическую амплитуду аномалии.

3. При  $h_d > 3$  отклонение кривой от линии глин против границ пласта составляет практически половину максимального отклонения. Строго это положение соблюдается только при  $h_d = \infty$ .

При  $h_d < 3$  отклонение кривой от линии глин на границах превышает половину максимального отклонения. Превышение тем больше, чем меньше  $h_d$  [28, 29].

Границам пласта при  $h_d > 3$  соответствуют точки перегиба кривой, отмечаемые на кривой градиента потенциала  $\frac{\partial U}{\partial z} = f(z_d)$  экстремумами.

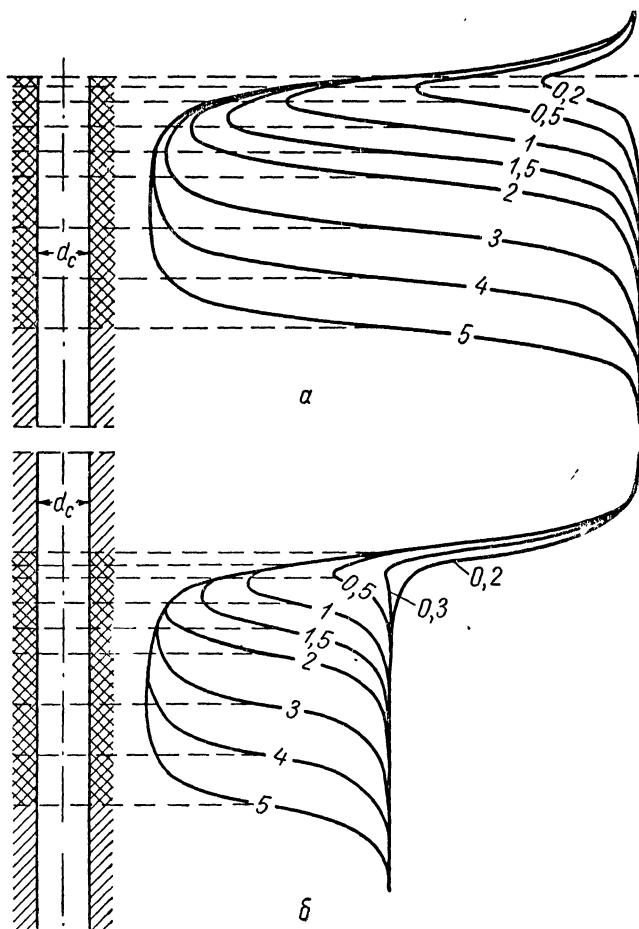


Рис. 52. Кривые  $U_{\text{СП}} = f(z)$  и  $\frac{\partial U}{\partial z} = f(z)$  для пластов с различным  $h/d_c$  при одинаковой статической амплитуде  $E_s$ .

$$\text{Шифр кривых} - \frac{h}{d_c}.$$

$$a - E_{p1} = E_{p3z}; \quad b - E_{p1} = 0,5 E_{p3z}; \quad q_{\text{вм}} = q_{\text{п}} = q_{\text{р}}.$$

При  $h_d < 3$  экстремумы смещаются в направлении от пласта к вмещающим породам, смещение тем больше, чем меньше  $h_d$ .

Если  $E_{0,3} \neq E_{0,1}$  и  $E_{3,2} \neq E_{1,2}$ , то аномалия  $U_{\text{СП}}$  становится асимметричной и будет характеризоваться двумя значениями статической амплитуды по отношению к линии потенциала в покрывающих и подстилающих пласт породах. Все сказанное выше относительно признаков, по которым можно определить положение границ пласта по кривой потенциала  $U_{\text{СП}}$ , остается в силе и для асимметричной аномалии, только для каждой границы используется соответствующее значение  $DE_s$ .

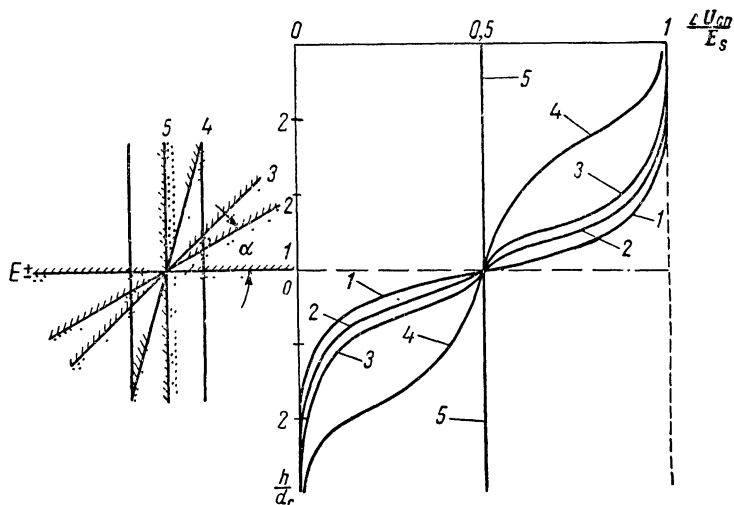


Рис. 53. Расчетные кривые  $U_{\text{СП}} = f(z_d)$  для наклонной границы раздела.

Шифр кривых — угол наклона  $\alpha$  (по данным [10]).  
 1 —  $\alpha = 0^\circ$ ; 2 —  $\alpha = 30^\circ$ ; 3 —  $\alpha = 45^\circ$ ; 4 —  $\alpha = 75^\circ$ ; 5 —  $\alpha = 90^\circ$ .

Если плоскость границ пласта перпендикулярна оси скважины, аномалия в пласте приобретает более сложную форму — против границ пласта возникают участки выполаживания кривой, причем границам при  $h_d > 4$  соответствуют точки перегиба в пределах выположенных участков (рис. 53). Естественно, что ширина аномалии отвечает в этом случае не истинной, а видимой мощности пласта. Расчетные графики, полученные при вычислении по формулам, приведенным в работах [10, 28], показывают, что описанный эффект становится заметным только при угле наклона  $\alpha > 30^\circ$ . Заметим, что при отсутствии четкого литологического контакта пласта с вмещающими породами и при горизонтальных границах раздела аномалия  $U_{\text{СП}}$  по форме будет напоминать аномалию для случая резкого контакта и наклонных границ [29].

## Неоднородная среда

Решение задачи о потенциале поля двойных слоев в электрически неоднородной среде значительно сложнее. Такие решения получены только для двух частных случаев.

В. Р. Бурсиан нашел выражение для потенциала при наличии одной границы раздела между средами с различной электрохимической активностью [9]. Схема расположения двойных слоев та же, что и при решении задачи для однородной среды, только удельное сопротивление пород  $Q_1 = Q_2$  отличается от удельного сопротивления скважины  $Q_p$ .

Если начало координат находится в точке пересечения оси скважины с границей раздела, то в соответствии с [9] величина потенциала на оси скважины определяется выражением:

$$U = \frac{E_s}{2} \int_0^{\infty} \frac{[(1-ab)I_1(t) - acY_1(t)]e^{-2tz_d}}{(1-ab)^2 + (ac)^2} dt, \quad (138)$$

$$\text{где} \quad b = -\frac{\pi}{2} t I_1(t) Y_0(t),$$

$$c = \frac{\pi}{2} t J_1(t) J_0(t);$$

$$a = \frac{Q_p}{Q_p} - 1, \text{ причем } Q_p = Q_1 = Q_3 = Q_{\text{вм}};$$

$I_1(t)$  — функция Бесселя первого рода первого порядка от мнимого аргумента;  $J_0(t)$ ,  $J_1(t)$  — функции Бесселя первого рода от действительного аргумента нулевого и первого порядка;  $Y_0(t)$ ,  $Y_1(t)$  — функции Неймана — Бесселя второго рода от действительного аргумента нулевого и первого порядка;  $t$  — переменная интегрирования. Значения величин  $E_s$ ,  $z_d$  — прежние.

Шень Цин-Сяном [79] получены кривые  $\frac{U_{\text{СП}}}{E_s} = f(z_d)$  для одной границы при различных значениях  $\frac{Q_p}{Q_p} = \text{const}$  (рис. 54) путем графического интегрирования подинтегрального выражения в формуле (138). Для  $\frac{Q_p}{Q_p} = 1$  теоретическая кривая совпадает с соответствующим графиком, рассчитанным по формуле (136) при  $h_d = \infty$  для одной границы.

Сочетая результаты расчетов, выполненных для отдельных границ пласта, можно на основе принципа суперпозиции полей получить кривые  $U = f(z_d)$  для пласта при условии  $Q_p = Q_1 = Q_3 \neq Q_p$ .

Анализ материалов позволяет отметить следующее.

1. При одинаковых значениях  $E_{3,2} = E_{1,2}$  и  $E_{0,3} = E_{0,1}$  аномалия  $U_{\text{СП}}$  в пласте является симметричной относительно его середины, как и в случае однородной среды.



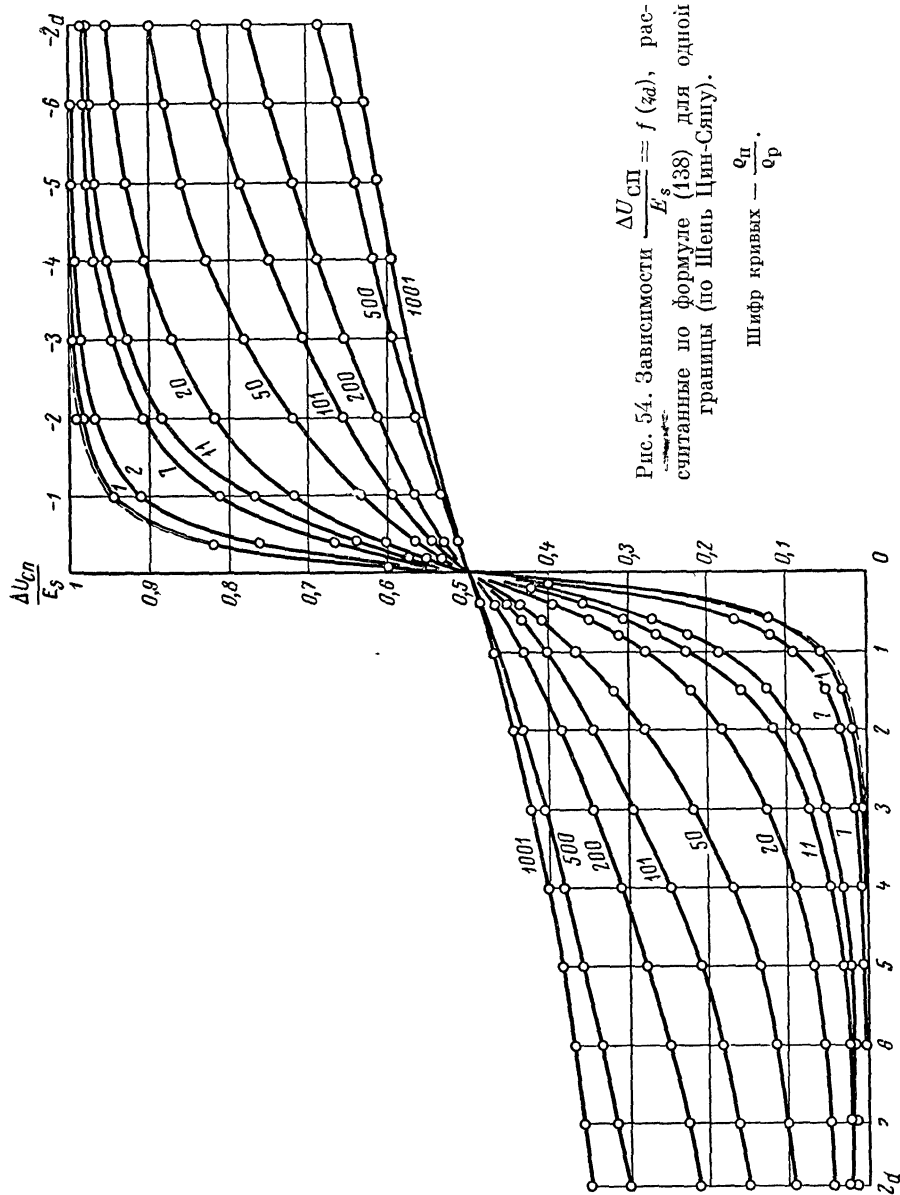


Рис. 54. Зависимости  $\frac{\Delta U_{сп}}{E_s} = f(q_d)$ , рассчитанные по формуле (138) для одной границы (по Шень Цин-Сяну).

Шифр кривых —  $\frac{q_d}{q_p}$ .

2. Максимальная амплитуда в пласте при фиксированном  $h_d = \text{const}$  определяется отношением  $\frac{q_{\text{п}}}{q_{\text{р}}}$ . Чем больше  $q_{\text{п}}/q_{\text{р}}$ , тем меньше отношение  $v_{\text{СП}}$ , характеризующее степень снижения фактической амплитуды аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  по сравнению со статическим значением  $E_s$ :

$$v_{\text{СП}} = \frac{\Delta U_{\text{СП}}}{E_s}. \quad (139)$$

Таким образом, качественно увеличение отношения  $\frac{q_{\text{п}}}{q_{\text{р}}}$  влияет на амплитуду  $\Delta U_{\text{СП}}$  так же, как уменьшение мощности пласта (рис. 55, а и б).

3. Точка перегиба графика  $U_{\text{СП}} = f(z_d)$  и экстремум графика градиента  $U_{\text{СП}}$  соответствуют точно границе сред при одной границе раздела.

Точки, в которых отклонение кривой от линии глин практически составляет половину максимальной амплитуды, соответствуют границам пласта только при больших  $h_d$ . Причем чем больше  $q_{\text{п}}/q_{\text{р}}$ , тем выше критическое значение  $h_{d \text{ кр}}$ , при котором это правило еще будет справедливо.

Условия задачи, решенной Л. М. Альпиным и С. М. Шейнманом, соответствуют терригенному разрезу с низкоомными глинистыми коллекторами, когда удельное сопротивление коллекторов, глин и бурового раствора близки. Условия задачи, решенной В. Р. Бурсианом, примерно соответствуют карбонатному разрезу, в котором удельные сопротивления пород с различной электрохимической активностью близки, но существенно отличаются от удельного сопротивления  $q_{\text{р}}$  бурового раствора. Однако на практике наиболее типичен следующий случай: пласт с аномальной электрохимической активностью, удельное сопротивление  $q_{\text{п}}$  которого отлично от удельного сопротивления  $q_{\text{вм}} = q_1 = q_3$  вмещающих пород и бурового раствора  $q_{\text{р}}$ . Кроме того, в пластах-коллекторах, которые являются основными объектами интерпретации, существует зона проникновения фильтра бурового раствора, вследствие чего появляются дополнительные условия: удельные сопротивления пласта в зоне проникновения  $q_{\text{зп}}$  и неизменной части  $q_{\text{п}}$  неодинаковы, а двойной слой при отсутствии проникновения, расположенный на границе скважины с пластом, смещается в глубь пласта, располагаясь на границе зоны с диаметром  $D$  и неизменной части пласта.

Л. М. Альпин и С. М. Шейнман решили задачу для пласта с удельным сопротивлением  $q_{\text{п}}$ , отличным от значений  $q_{\text{вм}} = q_{\text{р}}$  [3]. Ими было показано, что при  $q_{\text{п}} > q_{\text{вм}}$  аномалия  $\Delta U_{\text{СП}}$  деформируется по сравнению с аномалией для случая однородной среды таким образом, что точки перегиба смещаются внутрь пласта и аномалия сужается, тогда как при  $q_{\text{п}} < q_{\text{вм}}$  точки перегиба смещаются в сторону вмещающих пород при расширении аномалии.

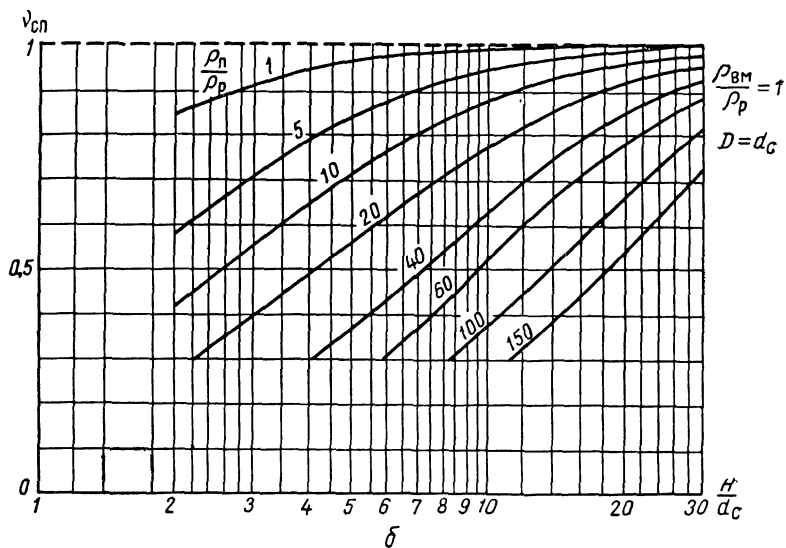
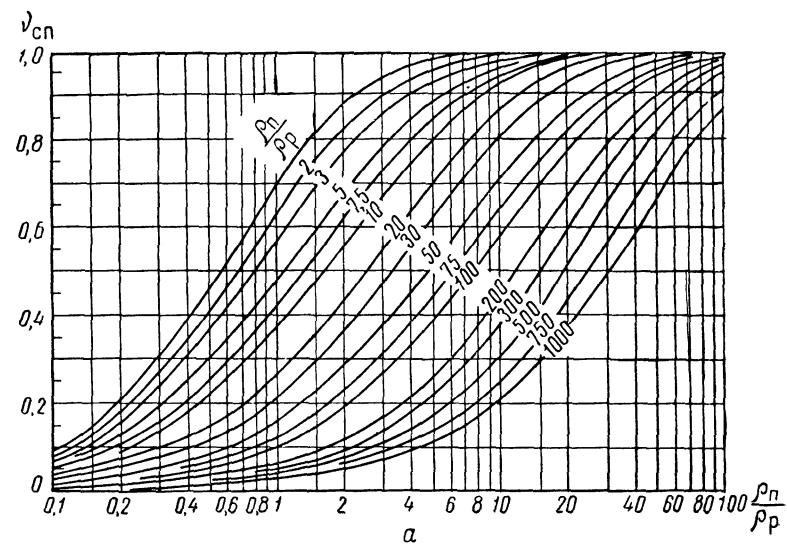


Рис. 55. Зависимости  $v_{cn} = f(h_d)$ .

Шифр кривых —  $\frac{q_{II}}{q_p}$ . а —  $q_{BM} = q_{II}$  (по данным [79]), б —  $q_{BM} = q_p$  (по данным [73]).

В работе [3] сделано допущение, что скважина против пласта имеет то же удельное сопротивление, что и пласт. Это допущение вносит существенное искажение, так как измеряемая амплитуда аномалии потенциалов собственной поляризации представляет собой падение напряжения собственной поляризации по стволу скважины.

В однородной среде поле в скважине будет симметрично относительно границы раздела сред с различными электрохимическими

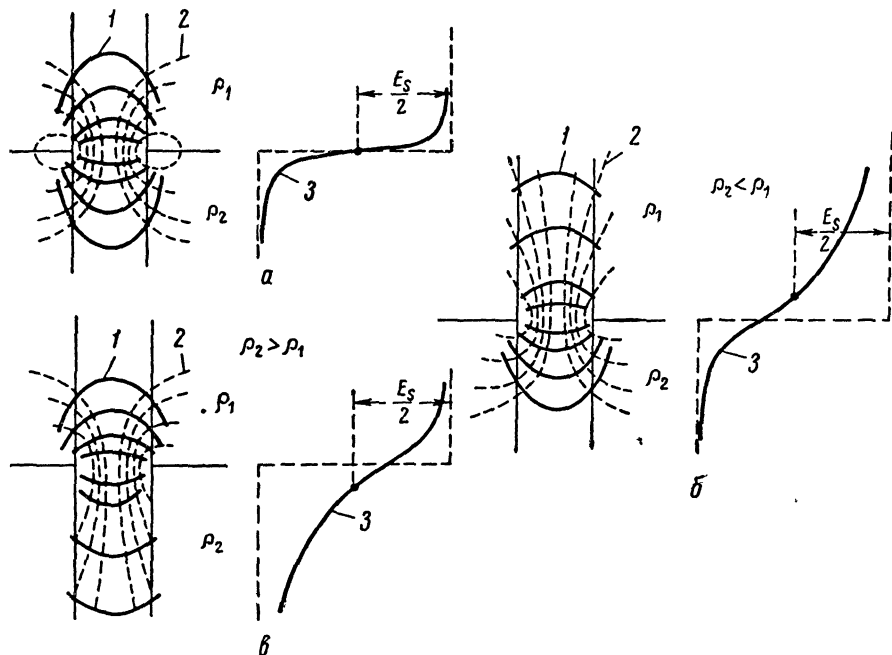


Рис. 56. Деформация поля двойных слоев в неоднородной среде.

*a* — однородная среда, *б, в* — неоднородные среды: *б* —  $\rho_1 > \rho_2$ , *в* —  $\rho_1 < \rho_2$ . 1 — эквипотенциальные поверхности, 2 — линии тока; 3 — кривая  $U_{СП}$ .

свойствами при отсутствии влияния второй границы. Наибольшее сгущение эквипотенциальных поверхностей при движении по оси скважины будет отмечено против границы и зарегистрировано наиболее крутым наклоном кривой потенциала или экстремумом градиента потенциала (рис. 56, *a*). Если  $\rho_2 \neq \rho_1$ , то произойдет деформация поля со смещением зоны наибольшего сгущения эквипотенциальных поверхностей в сторону среды высокого сопротивления: при  $\rho_2 > \rho_1$  вниз, т. е. внутрь пласта, а при  $\rho_2 < \rho_1$  вверх, т. е. в направлении вмещающих пород (рис. 56, *б, в, г*).

Анализ изменений характера поля в скважине позволяет в наглядной форме объяснить качественно основные особенности кривой  $U_{СП}$  в различных случаях и влияние на нее мощности пласта и электрической неоднородности среды.

Зависимость  $\Delta U_{\text{СП}}^{\text{max}} = f(h_d)$  в случае поля двойных электрических слоев в неоднородной среде при наличии зоны проникновения фильтрата бурового раствора получена Уорсингтоном и Мельдо путем моделирования на сеточной модели [73]. Данные работы [73] позволяют составить палетки кривых  $v_{\text{СП}} = f(h_d)$  для различных  $q_{\text{п}}/q_{\text{р}} = \text{const}$  (шифр кривых) при фиксированных значениях  $D_d = \frac{D}{d_c}$ ,  $\frac{q_{\text{зп}}}{q_{\text{р}}}$  и  $\frac{q_{\text{вм}}}{q_{\text{р}}}$  (шифр палеток). Примеры таких палеток приводятся на рис. 55, 57.

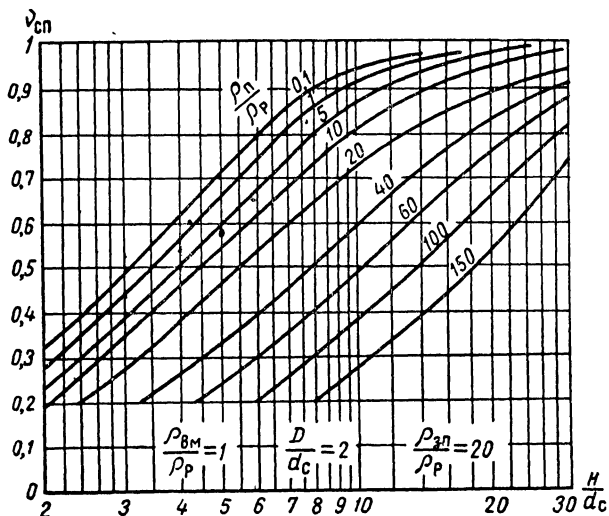


Рис. 57. Пример зависимостей  $v_{\text{СП}} = f(h)$  при наличии проникновения в пласт.

$$\text{Шифр кривых} - \frac{q_{\text{п}}}{q_{\text{р}}}.$$

Данные моделирования согласуются с результатами расчетов по формулам (136) и (138) для аналогичных условий. Они показывают также, каково влияние зоны проникновения и электрической неоднородности среды на амплитуду  $\Delta U_{\text{СП}}$ .

Увеличение параметра  $D_d$  при прочих постоянных условиях приводит к снижению амплитуды аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$ , т. е. качественно влияет так же, как увеличение диаметра скважины. Увеличение удельного сопротивления зоны проникновения при неизменных  $q_{\text{п}}$ ,  $q_{\text{р}}$ ,  $q_{\text{вм}}$  также вызывает уменьшение  $\Delta U_{\text{СП}}$ .

Сравнение кривых  $v_{\text{СП}} = f(h_d)$  для одинаковых  $q_{\text{п}}/q_{\text{р}} = \text{const}$ , полученных для условий  $q_{\text{п}} = q_{\text{вм}}$  и  $q_{\text{вм}} = q_{\text{р}}$ , обнаруживает существенную разницу между ними и невозможность использования палеток (рис. 55, а) для нахождения  $v_{\text{СП}}$  в пластах с  $q_{\text{п}} \neq q_{\text{вм}}$ .

Моделирование задачи осуществлялось при выполнении ряда упрощающих условий. Например, не учитывалось наличие двойного слоя на границе скважина — зона проникновения, который обусловлен различием адсорбционных свойств соприкасающихся сред. Граница между зоной проникновения и неизменной частью пласта рассматривалась как четкая и геометрически правильная.

Очевидно, что при сложной форме фронта проникновения и наличии постепенного перехода зоны к неизменной части пласта, влияние зоны проникновения будет несколько другим. В случае четкого контакта и сложной формы фронта проникновения влияние зоны проникновения на амплитуду  $\Delta U_{\text{СП}}$  будет определяться величиной телесных углов видимости контура зоны проникновения на пересечении его с кровлей и подошвой пласта. Следует, однако, заметить, что, поскольку действительное строение зоны проникновения и динамика ее развития во времени изучены совершенно недостаточно, в настоящее время трудно сформулировать более совершенные условия моделирования задачи.

Палетки рис. 55, 57 используются для определения коэффициента  $\gamma_{\text{СП}}$ , знание которого необходимо для расчета статической или приведенной амплитуды  $\Delta U_{\text{СП}}$  по известной величине амплитуды, зарегистрированной на диаграмме.

Наиболее существенна поправка в фактическую амплитуду  $\Delta U_{\text{СП}}$  для тонких пластов. Именно при наличии в этих пластах проникновения определение параметров зоны проникновения и неизменной части пласта производится приближенно, а нередко становится невозможным. Это обстоятельство является основным ограничением в применении палеток Уорсингтона и Мельдо.

## § 17. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ФОРМУ КРИВОЙ $U_{\text{СП}}$

### Изменение диаметра скважины

Пласты-коллекторы нередко залегают среди глин, диаметр скважины в которых увеличен по сравнению с номинальным. Выясним, как влияет изменение диаметра скважины во вмещающих породах на амплитуду аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  в пласте-коллекторе.

Для однородной среды при схеме расположения двойных слоев, показанной на рис. 58, в случае  $E_{3,2} = E_{1,2} = E_{\text{ВМ П}}$  и  $E_{0,3} = E_{0,1} = E_{\text{Р ВМ}}$  путем рассуждений, аналогичных приведенным при получении формулы (136), получим для потенциала  $U_{\text{М}}$  на оси скважины следующее выражение:

$$U_{\text{М}} = \left(1 - \frac{\omega'_p - \omega'_q}{4\pi}\right) E_{\text{Р ВМ}} - \frac{\omega_p - \omega_q}{4\pi} E_{\text{ВМ П}} - \frac{\omega_p - \omega_q}{4\pi} E_{\text{П Р}}, \quad (140)$$

$$\text{где} \quad \omega'_p = 2\pi \left(1 - \frac{2z_d - h_d}{V(z_d - h_d)^2 + d_{\text{К}}^2}\right);$$

$$\begin{aligned}\omega'_q &= 2\pi \left( 1 - \frac{2z_d + h_d}{\sqrt{(2z_d + h_d)^2 + d_k^2}} \right); \\ \omega_p &= 2\pi \left( 1 - \frac{2z_d - h_d}{\sqrt{(2z_d - h_d)^2 + 1}} \right); \\ \omega_q &= 2\pi \left( 1 - \frac{2z_d + h_d}{\sqrt{(2z_d + h_d)^2 + 1}} \right).\end{aligned}$$

Обозначения  $z_d$ ,  $h_d$  имеют прежний смысл;  $d_k$  — относительный диаметр скважины во вмещающих породах (в каверне); значения  $\omega'_p$  и  $\omega'_q$  видны на рис. 58.

Сравнение результатов расчетов по формуле (140) с кривой  $U_{\text{СП}} = f(z_d)$  для случая, когда не происходит увеличения диаметра скважины во вмещающих породах, показывает, что в пластах ограниченной мощности при  $d_k > d_c$  наблюдается соответствующее уменьшение амплитуды  $\Delta U_{\text{СП}}$ . Это уменьшение тем значительней, чем больше  $d_k$  и чем меньше относительная мощность пласта  $h_d$ .

Однако нетрудно заметить, что рассмотренный вариант задачи не вполне точно воспроизводит реальные условия. В действительности профиль ствола скважины при расширении диаметра во вмещающих породах будет несколько отличаться от изображенного на рис. 58, а, б. Как видно, в этом случае (рис. 58, в) телесные углы видимости каждого из пяти двойных слоев не изменятся по сравнению с классической схемой рис. 51, поэтому, если при увеличении диаметра скважины во вмещающих породах не изменились значения скачков потенциала  $E_{p\text{п}}$ ,  $E_{\text{вмп}}$ , форма кривой  $U_{\text{СП}}$  сохранится прежней. Нетрудно показать также, что при наличии локальных каверн в толще глинистых пород на кривой  $U_{\text{СП}}$  не будет наблюдаться аномалии при условии сохранения постоянным скачка  $E_{p\text{вм}}$  во всей толще.

Однако в практике иногда наблюдаются смещения «линии глин» на кривой  $U_{\text{СП}}$ , соответствующие интервалам резкого увеличения диаметра скважины. По мнению Д. А. Шапиро такое смещение может быть вызвано образованием выщелоченного слоя разбухшей глины близ стенок скважины, так как разбухание глин приводит к снижению диффузионно-адсорбционной активности образца вследствие уменьшения скачка  $E_{p\text{вм}}$ .

В том случае, когда скважина бурилась на высокоминерализованном растворе, который в последующем был заменен на более пресный возникает скачок в кавернах, возможно, за счет сохранения в них минерализованного раствора. Это приводит к появлению дополнительного скачка  $E'_{p\text{вм}}$ , близкого к величине диффузионной э. д. с. для растворов соответствующих концентраций; при одновременном уменьшении скачка  $E_{p\text{вм}}$  на границе скважины с породой ввиду близости минерализации их вод. В результате такая каверна отметится на кривой  $U_{\text{СП}}$  отрицательной аномалией. Аналогичный эффект вызывает наличие цемента в кавернах [5].

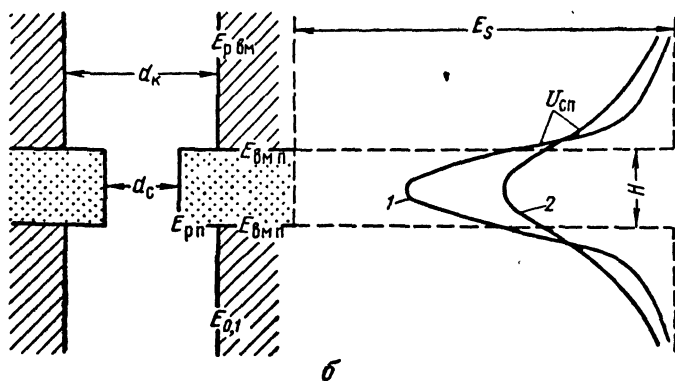
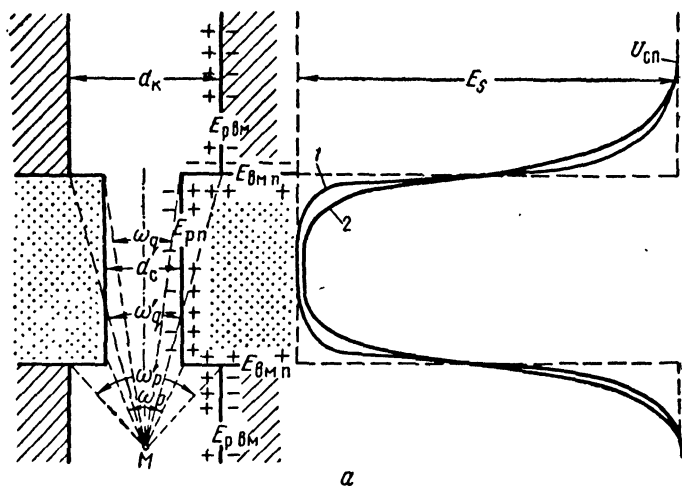
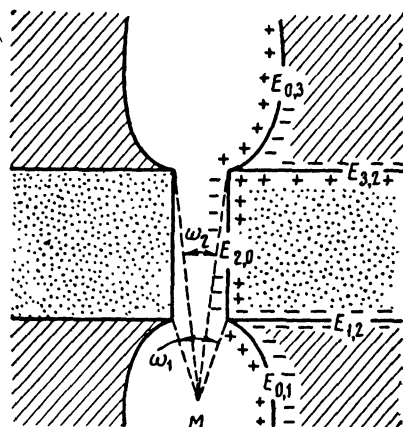


Рис. 58. Влияние каверны в глинах на амплитуду  $U_{СП}$  в пласте.

$\alpha, \beta$  — модели, принятые для вывода уравнения (140), и кривые  $U_{\text{СП}}$ , рассчитанные по уравнению (140):  $\alpha - \frac{H}{d_c} = 10$ ,  $\beta - \frac{H}{d_c} = 1$ ;  $1 - d_K = d_c$ ;  $2 - d_K = 2d_c$ ;  $\epsilon$  — модель, более близкая к реальным условиям.





## Кривая $U_{СП}$ в пачке пластов

Выше рассматривалась форма кривой  $U_{СП}$  для одиночных пластов. На основании принципа суперпозиции полей можно получить

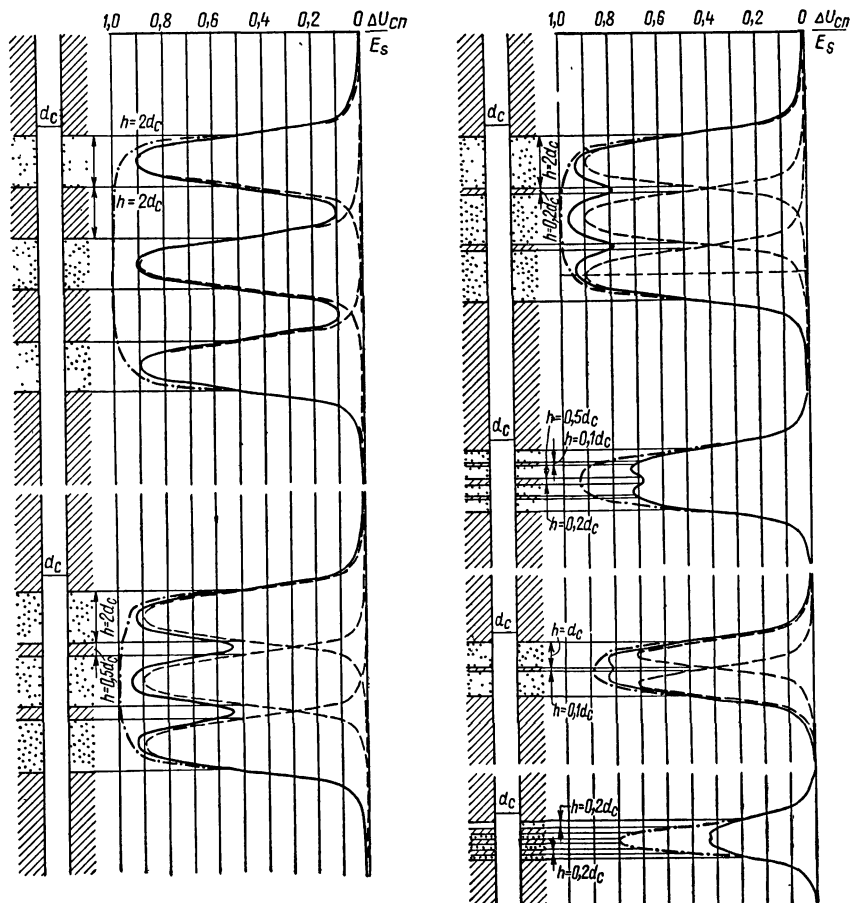
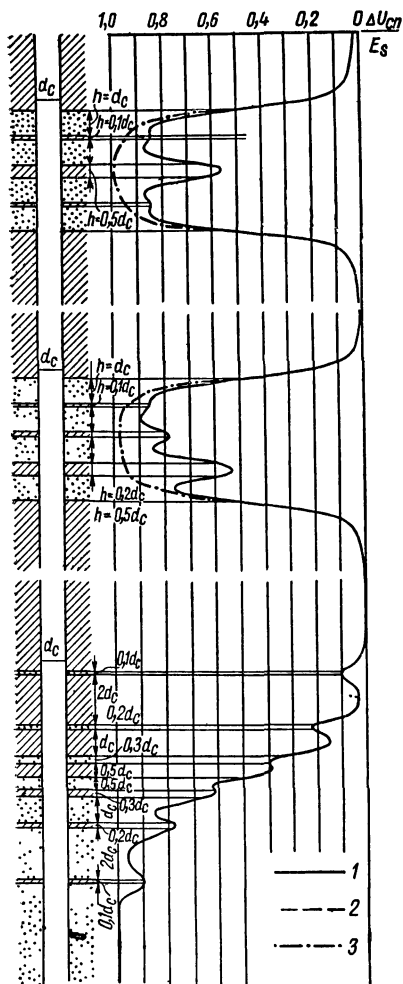


Рис. 59. Кривые потенциалов собственной поляризации

$1$  — кривые  $U_{СП}$  в пачке пластов;  $2$  — то же, в отдельном пропластке;  $3$  — то же, мощности

кривые изменения потенциала по оси скважины для различных сочетаний пластов в однородной и неоднородной средах, используя результаты расчетов для одного пласта при соответствующих условиях.

Пачка, представленная чередованием прослоев с различной электрохимической активностью, например, пески и глины, при одинаковом значении статической амплитуды в каждом прослое песка отмечается изрезанным участком кривой  $U_{\text{СП}}$  на фоне общего



в пачке пластов (по В. Н. Дахнову).  
в однородном пласте, по мощности равном пачки.

глинистых прослоев  $q_{\text{гл}}$  и наличием проникновения фильтра бурового раствора в песчаные прослои зависимость параметра  $\alpha$  от  $\chi_{\text{гл}}$  становится более сложной. Этот вопрос был изучен Г. Дол-  
лем.

отклонения кривой от линии глин, соответствующего пачке в целом. С уменьшением мощности  $h_{\text{пр}}$  каждого прослоя изрезанность кривой в пределах пачки уменьшится (рис. 59). Ниже некоторого критического значения  $h_{\text{пр}}$ , величина которого зависит от удельных сопротивлений прослоев, бурового раствора и диаметра скважины, вся пачка отмечается на кривой как однородный пласт максимальной амплитудой аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$ , меньшей ее значения  $E_s$  для чистых песчаных прослоев. Степень снижения амплитуды, характеризуемая отношением  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\Delta U_{\text{СП}}}{E_s}. \quad (141)$$

В однородной среде величина  $\alpha$  линейно зависит от содержания  $\chi_{\text{гл}}$  в песчаной пачке глинистых прослоев:

$$\chi_{\text{гл}} = \frac{\sum h_i}{H}, \quad (142)$$

где  $h_i$  — мощность отдельных глинистых прослоев;  $H$  — общая мощность пачки.

При этом  $\alpha$  изменяется линейно от единицы до нуля при возрастании  $\chi_{\text{гл}}$  от нуля до единицы. В неоднородной среде с различными значениями удельного сопротивления песчаных  $q_{\text{п}}$  и

$$\alpha = \frac{\lg \frac{u+q}{1+q}}{\lg u}, \quad (143)$$

где

$$u = \frac{Q_{\Pi}}{Q_{ЭП}}; \quad q = \frac{\chi_{ГЛ}}{1 - \chi_{ГЛ}} \frac{Q_{\Pi}}{Q_{ГЛ}}.$$

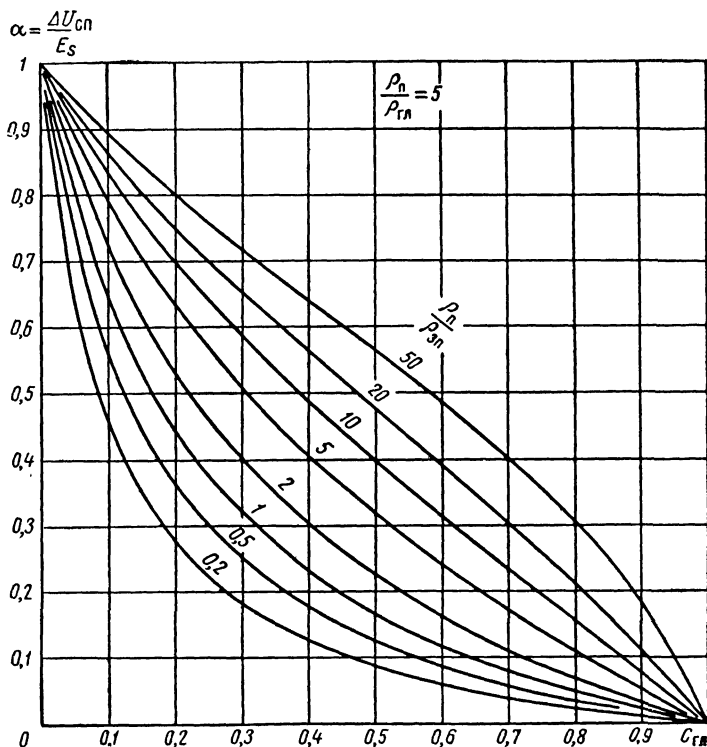


Рис. 60. Палетка для определения параметра  $\chi_{ГЛ}$  по относительной амплитуде  $U_{СП}$ .

Шифр кривых —  $\frac{Q_{\Pi}}{Q_{ЭП}}$ . Шифр палетки —  $\frac{Q_{\Pi}}{Q_{ГЛ}} = 5$ .

Несмотря на то, что исходные положения Г. Долля значительно упрощают истинную картину, в них не учитывается влияние такого важного фактора, как диаметр зоны проникновения  $D$ , кривые  $\alpha = f(\chi_{ГЛ})$ , рассчитанные по формуле (143) для различных фиксированных значений  $Q_{\Pi}/Q_{ЭП}$  и  $Q_{\Pi}/Q_{ГЛ}$  (рис. 60), соответствуют наблюдаемым в природе закономерностям в поведении амплитуды  $\Delta U_{СП}$  в слоистых глинистых песках.

В частности, теория Г. Долля позволяет объяснить снижение величины  $\alpha$  в нефтегазонасыщенной части песчано-глинистой пачки по сравнению с величиной этого параметра в водоносной части пачки в связи с влиянием омических факторов  $Q_{\Pi}/Q_{ЭП}$  и  $Q_{\Pi}/Q_{ГЛ}$ .

### Кривая $U_{СП}$ в высокоомном разрезе

Расчеты по формуле (138) и результаты моделирования показывают, что при большом различии между удельными сопротивлениями пород и скважины кривая  $U_{СП}$  становится сглаженной и пласты с электрохимической активностью, аномальной по отношению к  $A_{да}$  вмещающих пород, отмечаются нечетко (рис. 61).

Рассматриваемые условия обычно являются типичными для карбонатного разреза. Чтобы повысить эффективность метода  $U_{СП}$ , рекомендуется применять его модификацию — метод селективированных потенциалов собственной поляризации [37]. Сущность метода заключается в том, что в скважине регистрируется разность потенциалов между электродом  $M$  и электродами  $N'$ ,  $N''$ , расположенными выше и ниже электрода  $M$  и соединенными друг с другом. Среднее значение потенциалов  $U_{N'}^{ср}$ ,  $U_{N''}^{ср}$  на электродах  $N'$ ,  $N''$  поддерживается постоянным, равным определенной величине, задаваемой на основании конкретных условий регистрации. Это осуществляется с помощью двух других электродов  $A'$ ,  $A''$ , соединенных между собой и расположенных вблизи электродов  $N'$ ,  $N''$ . К электродам  $A'$  и  $A''$  подается управляющий ток, величина которого с помощью специальной электронной схемы

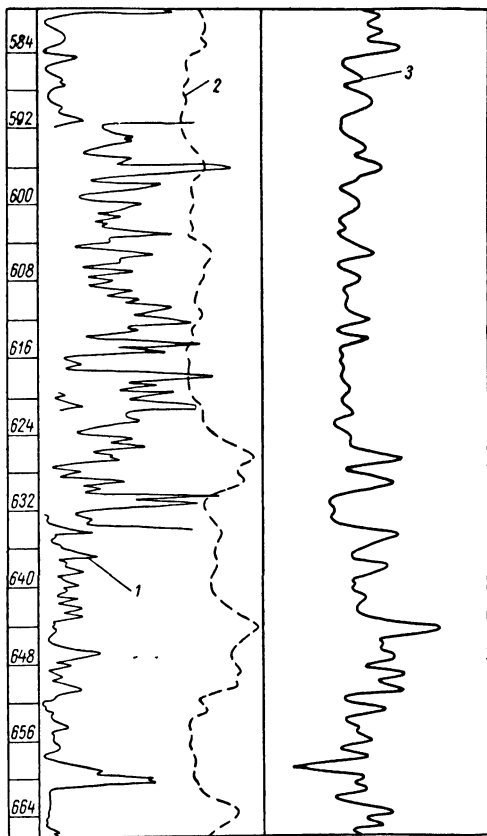


Рис. 61. Сопоставление кривых  $U_{СП}$  и селективированных потенциалов собственной поляризации в карбонатном разрезе. Отложения карбона Ромашкинского месторождения (по данным Н. З. Залаяева).

К р и в ы е: 1 — КС; 2 — СП; 3 — селективированного СП.

или полуавтоматического устройства изменяется таким образом, чтобы соблюдалось условие постоянства  $U_{N'N''}^{cp}$  (рис. 62). Такая схема позволяет устранить влияние деформации естественного электрического поля в скважине, вызванное омическим фактором, на форму кривой  $U_{сп}$ .

Метод до сих пор не нашел широкого применения ни в США, ни в других зарубежных странах, ни в СССР, хотя эффективность его очевидна и подтверждается, в частности, примером по карбонатным отложениям палеозоя Татарии, приведенным на рис. 61.

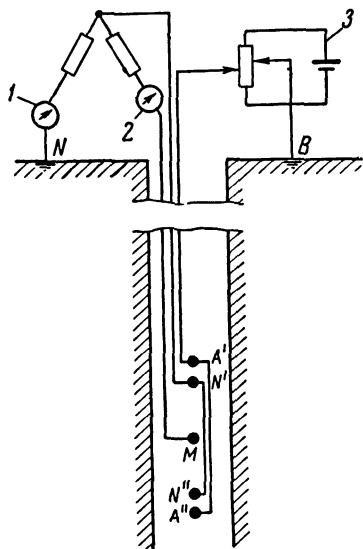


Рис. 62. Схема измерений по методу селективного СП (по Г. Дюллю).

1 — прибор, измеряющий потенциал электродов  $N'$ ,  $N''$ ; 2 — прибор, регистрирующий кривую селективного СП; 3 — потенциометрический контур, питающий электроды  $A'$ ,  $A''$ .

пласта изменится по сравнению со случаем насыщения соленой водой всего пласта, что приведет в соответствии с (127) к изменению величины  $\Delta E_{сп}$  при переходе из пласта к подстилающим породам. В результате произойдет смещение линии глин ниже пласта, что можно ошибочно истолковать как изменение литологии подстилающих пласт глин по сравнению с глинами, покрывающими пласт (рис. 63, а). Примеры такого смещения встречаются в практике геофизических исследований скважин на месторождениях восточной Татарии и западной Башкирии.

2. При наличии в пласте трех «слоев» с водами различной минерализации возможны два варианта:

### Кривая $U_{сп}$ в коллекторе с неоднородным составом жидкости

На нефтяных месторождениях с законтурным заводнением продуктивных пластов скважины, расположенные вблизи контура нагнетаемой пресной воды, нередко пересекают отдельные прослой, насыщенные пресной водой наряду с другими, в которых сохраняется пластовая минерализованная вода. Так как граница между пресной и соленой водой в чистом коллекторе не отмечается, то расчет потенциалов  $U_{сп}$  для случая однородной среды и заданных условий приводит к следующему [4].

1. Если верхняя часть пласта содержит соленую воду, а нижняя — насыщена пресной водой, величина скачка  $E_{1,2}$  в подошве

а) вверху и внизу сохранилась пластовая вода, прорыв пресной произошел в средней части пласта, в этом случае значения скачков  $E_{3,2}$  и  $E_{1,2}$  в кровле и подошве пласта не изменятся, смещения

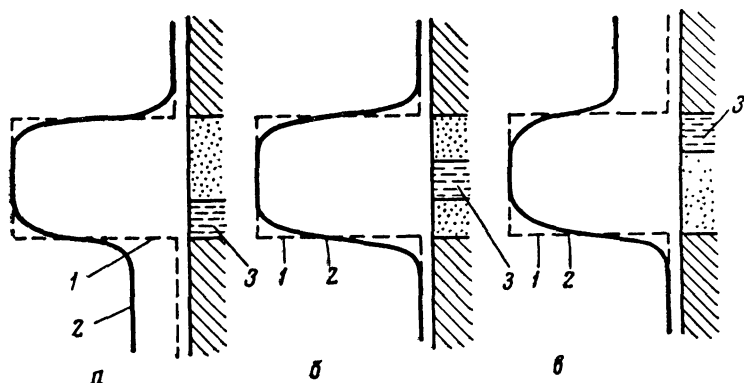


Рис. 63. Влияние пресной законтурной воды на аномалию  $\Delta U_{СП}$  (по А. П. Анпилову).

Пресная вода: а — в подошве пласта; б — в середине пласта; в — в кровле пласта. 1 — статическая кривая  $U_{СП}$  до подхода пресной воды к скважине; 2 — кривая  $U_{СП}$  после прорыва пресной воды; 3 — пресная вода.

линии глин не произойдет и величина аномалии сохранится прежней (рис. 63, б);

б) прорыв пресной воды произошел в верхней и нижней частях пласта, в средней — сохранилась пластовая вода — в этом случае происходит смещение линии глин выше и ниже пласта, амплитуда аномалии  $\Delta U_{СП}$  на соответствующем контакте уменьшается (рис. 63, а, в).

#### § 18. СВЯЗЬ МЕЖДУ ДИФфуЗИОННО-АДСОРБЦИОННОЙ АКТИВНОСТЬЮ И СТАТИЧЕСКОЙ АМПЛИТУДОЙ $E_s$

Выше рассматривались различные варианты влияния геометрического и омического факторов на форму кривой  $\Delta U_{СП}$  при заданных значениях скачков  $E$  потенциала на границах сред с различной диффузионно-адсорбционной активностью. Выясним теперь, какая связь существует между статической амплитудой  $E_s$  и диффузионно-адсорбционной активностью пласта и вмещающих пород.

Условия измерения в скважине величины  $E_s$  песчаного пласта, залегающего в глинах, без учета геометрического и омического факторов моделирует электрохимическая ячейка (рис. 64), в которой последовательно расположены: раствор с концентрацией  $C_\phi$ , образцы глины и песчаника, насыщенные раствором с концентрацией  $C_v$ , и вновь раствор с концентрацией  $C_\phi$ . На трех контактах

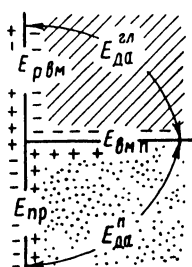
в последовательности слева направо возникнут соответственно скачки потенциала, аналогичные  $E_{р\text{ в м}}$ ,  $E_{в м п}$  и  $E_{п р}$ . Нетрудно показать, что в случае неглинистого песчаника:

$$E'_{\text{да}} = E_{р\text{ в м}} + E_{в м п} = K_{\text{да}}^{\text{в м}} \lg \frac{C_{\text{ф}}}{C_{\text{в}}},$$

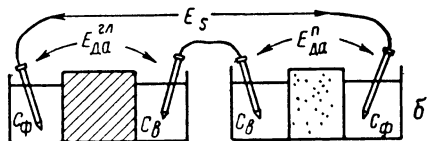
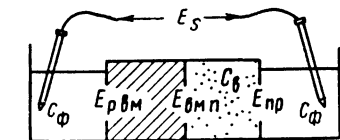
$$E''_{\text{да}} = E_{п р} = K_{\text{да}}^{\text{п}} \lg \frac{C_{\text{в}}}{C_{\text{ф}}} = K_{\text{д}} \lg \frac{C_{\text{в}}}{C_{\text{ф}}},$$

следовательно,

$$E_s = E_{р\text{ в м}} + E_{в м п} + E_{п р} = (K_{\text{да}}^{\text{в м}} - K_{\text{да}}^{\text{п}}) \lg \frac{C_{\text{ф}}}{C_{\text{в}}}. \quad (144)$$



а



б

Рис. 64. Электрохимическая ячейка в скважине и ее лабораторная аналогия.

а, б — различные варианты лабораторной аналогии.

Здесь  $K_{\text{да}}^{\text{в м}}$  и  $K_{\text{да}}^{\text{п}}$  — коэффициенты диффузионно-адсорбционной э. д. с. глины и песчаника [29, 60].

Равенство (144) справедливо и для варианта с двумя последовательно расположенными электрохимическими ячейками, в одной из которых растворы разделены образцом глины, в другой — образцом чистого песчаника. Заметим, что как это выражение, так и последующие выводы справедливы для контакта с глиной любой породы.

Величина  $E_s$  чистого песчаника является функцией: алгебраической разности коэффициентов диффузионно-адсорбционной э. д. с. вмещающих пород и песчаника, отношения концентраций пластовой воды и фильтрата бурового раствора (или воды, заполняющей скважину). Чем больше различие минерализации пластовых вод и бурового раствора, тем больше величина  $E_s$ . При равенстве минерализации пластовых вод и бурового раствора  $E_s = 0$  и аномалия  $\Delta U_{\text{СП}}$  в пласте отсутствует. Знак  $E_s$  и аномалии на кривой  $U_{\text{СП}}$  в пласте определяется соотношением величин  $C_{\text{в}}$  и  $C_{\text{ф}}$ . Обычно для коллекторов продуктивных горизонтов нефтяных и газовых месторождений при бурении скважин на пресном глинистом растворе или пресной воде  $C_{\text{в}} > C_{\text{ф}}$ , следовательно  $E_s < 0$ , песчаный пласт отмечается отрицательной аномалией  $\Delta U_{\text{СП}}$ . Если  $C_{\text{в}} < C_{\text{ф}}$ , что может иметь место при бурении на соленом растворе в пластах, насыщенных слабо минерализованной водой,  $E_s > 0$  и коллектору соответствует положительная аномалия  $\Delta U_{\text{СП}}$ .

Если в рассматриваемой модели заменить образец чистого песчаника глинистым, можно предположить, что уравнение (144) и интерпретация с помощью модели (рис. 64) будут справедливы и в этом случае, хотя, строго говоря, это не совсем так. Действительно, в соответствии с представлениями Теорелла:

$$E_{1,2} = E_{\Phi 1,2} + E_{д1} + E_{\Phi 1,0} + E_{д2} + E_{\Phi 2,0}. \quad (145)$$

Здесь  $E_{\Phi 0,1}$ ,  $E_{\Phi 1,2}$ ,  $E_{\Phi 2,0}$  — скачки граничных фазовых потенциалов на контактах пресного раствора с глиной, глины с песчаником и песчаника с пресным раствором;  $E_{д1}$ ,  $E_{д2}$  — диффузионные э. д. с. для образцов глины и песчаника, рассчитываемые по уравнению (56). Для того чтобы доказать тождество уравнений (144) и (145), необходимо, чтобы

$$E_{\Phi 1,2} = E_{\Phi 1в} + E_{\Phi 2в}, \quad (146)$$

где  $E_{\Phi 1в}$  и  $E_{\Phi 2в}$  — фазовые скачки потенциала на контакте глины и песчаника с раствором концентрации  $C_в$ . В общем случае это доказать нельзя, но расчеты по уравнениям (144) и (145) показывают, что величина  $E_{\Phi 1,2}$  и алгебраическая сумма  $E_{\Phi 1в}$  и  $E_{\Phi 2в}$  мало различаются между собой, поэтому для практических целей при анализе компонент величины  $E_s$  уравнение (144) можно распространить и на глинистые песчаники. При этом наряду с изложенным можно сделать заключение, что величина  $E_s$  зависит не только от отношения  $\frac{C_в}{C_\Phi}$ , но и от различия в значениях  $K'_{да}$  и  $K''_{да}$ . В частности, при одинаковых значениях  $K'_{да} = K''_{да}$  для пласта и вмещающих пород даже в случае их разной литологии аномалии  $\Delta U_{СП}$  в пласте не возникнет.

Учитывая соотношения (28) и (144), можно показать, что величина  $E_s$  пропорциональна разности коэффициентов диффузионно-адсорбционной активности  $A'_{да}$  и  $A''_{да}$  для данной пары растворов с концентрациями  $C_в$  и  $C_\Phi$ :

$$E_s = (A'_{да} - A''_{да}) \lg \frac{C_\Phi}{C_в}. \quad (147)$$

Заменяя в выражениях (144), (147) отношение  $\frac{C_\Phi}{C_в}$  отношением  $Q_в/Q_\Phi$ , получим [30]:

$$E_s \approx (K'_{да} - K''_{да}) \lg \frac{Q_в}{Q_\Phi} = (A'_{да} - A''_{да}) \lg \frac{Q_в}{Q_\Phi}. \quad (148)$$

Эти выражения удобнее использовать для практики, поскольку обычно приходится иметь дело с удельными сопротивлениями, а не с концентрациями растворов.

В выражениях (144), (147), (148) множитель перед логарифмом отношения концентраций или удельных сопротивлений растворов



можно обозначить  $K_{\text{СП}}$ , рассматривая его как коэффициент статической аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$ . Тогда

$$E_s = K_{\text{СП}} \lg \frac{C_{\text{в}}}{C_{\text{ф}}} \approx K_{\text{СП}} \lg \frac{q_{\text{в}}}{q_{\text{ф}}}. \quad (149)$$

Для контакта чистого песчаника ( $A_{\text{да}} = 0$ ) с глиной, эквивалентной среде с предельно высокими адсорбционными свойствами, при  $t = 18^\circ \text{C}$   $K'_{\text{да}} = 58 \text{ мв}$ ,  $K''_{\text{да}} = -11,6 \text{ мв}$ ,  $K_{\text{СП}} = 69,6 \text{ мв}$ , следовательно:

$$E_s = 69,6 \lg \frac{q_{\text{в}}}{q_{\text{ф}}}. \quad (150)$$

При температуре  $t \neq 18^\circ \text{C}$  для тех же условий приближенно можно считать:

$$E_s \approx 69,6 \frac{t + 273}{291} \lg \frac{q_{\text{в}}}{q_{\text{ф}}} \quad (151)$$

и при любом значении  $K_{\text{СП } 18^\circ \text{C}}$ :

$$E_{s \text{ } t^\circ \text{C}} = K_{\text{СП } 18^\circ \text{C}} \frac{t + 273}{291} \lg \frac{q_{\text{в}}}{q_{\text{ф}}} \frac{t}{t}. \quad (152)$$

Строго говоря, зависимость  $K_{\text{СП}}$  и амплитуды  $E_s$  от температуры должна быть более сложной, особенно при  $t > 100^\circ \text{C}$ , однако этот вопрос не достаточно изучен.

Формулы (149), (150) позволяют наглядно представить связь амплитуды  $E_s$  с основными факторами, ее определяющими, поэтому методическое значение их несомненно. Однако следует помнить, что параметры  $K_{\text{да}}$ ,  $A_{\text{да}}$  и  $K_{\text{СП}}$ , определяемые в основном литологическим составом пород, являются также функциями отношения и абсолютных значений концентраций растворов, поэтому при практическом использовании подобных формул, например, для оценки минерализации  $C_{\text{в}}$  пластовых вод по данным метода потенциалов собственной поляризации, возникает необходимость введения поправки в значение  $K_{\text{СП}}$  для приведения его к некоторым стандартным значениям концентрации. Относительно способа введения поправки не существует единой точки зрения [29, 44, 59, 80]. Можно также интерпретировать  $E_s$  непосредственно как алгебраическую сумму значений  $E'_{\text{да}}$  и  $E''_{\text{да}}$ , что позволяет использовать палетку (рис. 7) как для определения параметра  $E_s$  при заданной характеристике  $q_{\text{гд}}$  и  $q_{\text{п}}$  адсорбционных свойств контактирующих пород и значений  $C_{\text{в}}$  и  $C_{\text{ф}}$  (или  $q_{\text{в}}$  и  $q_{\text{ф}}$ ), так и для решения обратной задачи.

Заканчивая раздел настоящей главы, посвященный полям э. д. с. диффузионного происхождения, остановимся на сопоставлении результатов измерения  $U_{\text{СП}}$  в скважине с данными лабораторного исследования диффузионно-адсорбционных э. д. с.

Сопоставление значений  $E_s$  с графиками палетки рис. 7 проводят с целью:

- а) оценки качества диаграмм  $U_{\text{СП}}$ , прежде всего проверки правильности масштаба диаграмм;
- б) определения адсорбционной характеристики глин;
- в) выяснения вопроса о том, являются ли в конкретных условиях данного месторождения для изучаемых объектов э. д. с. диффузионного происхождения единственным или, по крайней мере, главным фактором, определяющим величину  $E_s$ .

Для этого выполняют следующие операции.

1. Определяют статическое значение  $E_s$  в чистых неглинистых пластах исследуемой части разреза, которые имеют нулевую диффузионно-адсорбционную активность и характеризуются значением параметра  $q_{\text{п}} = 0$ . Определения проводят в ряде скважин при различных условиях измерения, в результате чего получают серию значений  $E_s^{\text{max}}$  для различных  $q_{\text{р}}$ .

В качестве объекта определения  $E_s$  лучше всего выбрать один и тот же мощный выдержанный по площади пласт чистого песчаника или известняка.

2. Все значения  $E_s$ ,  $q_{\text{р}}$  и соответствующие им  $q_{\text{ф}}$  приводятся к температуре, для которой получена палетка, изображенная на рис. 7.

3. На семейство графиков (рис. 7) наносят точки, абсциссами которых являются значения  $q_{\text{ф}}$ , а ординатами — значения  $E_s$ , откладываемые по вертикали вверх от условной оси абсцисс — графика  $q_{\text{п}} = 0$ . Если фактическое  $q_{\text{в}}$  отличается от значения, для которого составлена палетка, последнюю перестраивают для заданного  $q_{\text{в}}$  таким образом:

а) проводят вертикальную линию через точку на оси абсцисс, соответствующую заданному  $q_{\text{в}}$ ;

б) осуществляют по вертикали параллельный перенос всех графиков  $E_{\text{да}} = f(\lg C_2)$  для различных  $q_{\text{п}} = \text{const}$  так, чтобы все графики сошлись в указанной в п. (а) точке на оси абсцисс.

4. В результате сопоставления точек с графиками получают один из следующих вариантов.

а. Точки расположены неслучайно с большой дисперсией — обычно это свидетельствует о неправильном масштабе диаграмм  $U_{\text{СП}}$  и ошибках в определении  $q_{\text{р}}$  и  $q_{\text{ф}}$ ; в этом случае обработка материалов бесполезна — материал некачественный, особенно если часть точек находится за пределами графика  $E_{\text{да}} = f(\lg C_2)$  для идеально адсорбирующей породы (рис. 65, а).

б. Во всем диапазоне  $q_{\text{ф}}$  большая часть точек расположена закономерно с некоторой дисперсией вдоль одного из графиков  $E_{\text{да}} = f(\lg C_2)$  с фиксированным значением  $q_{\text{п}}$  (см. рис. 65, б, кривая 5). Это  $q_{\text{п}}$  можно считать осредненным значением параметра для глин данного горизонта. График использовать в дальнейшем при решении различных задач как линию отсчета, соответствующую линии глин на диаграмме  $U_{\text{СП}}$  (рис. 65, б).

в. При малых значениях  $q_{\text{ф}}$  большая часть точек расположена вдоль графика с фиксированным  $q_{\text{п}}$  как и в предыдущем случае.

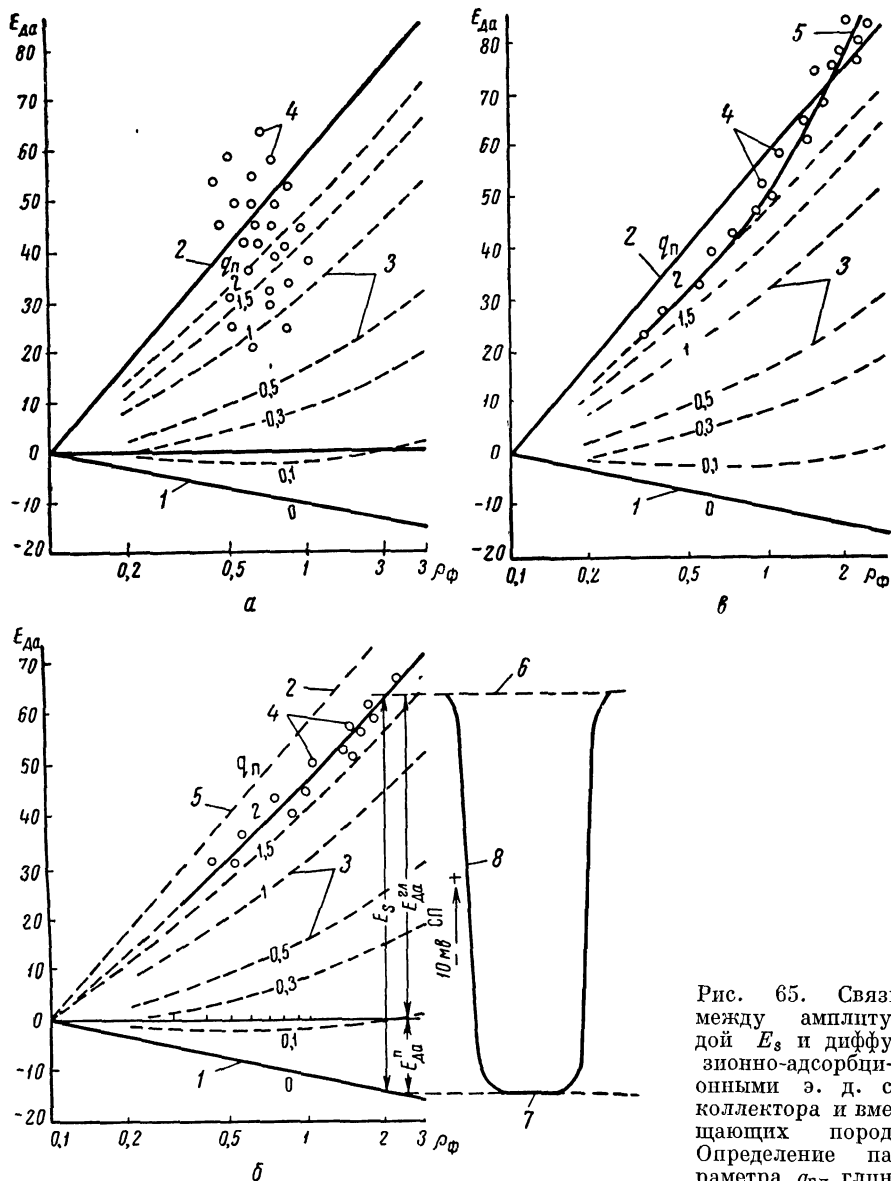


Рис. 65. Связь между амплитудой  $E_s$  и диффузионно-адсорбционными э. д. с. коллектора и вмещающих пород. Определение параметра  $q_{гд}$  глин.

$a$  — параметр  $q_{гд}$  не определяется;  $б$  — параметр  $q_{гд}$  определяется, фильтрационная компонента  $E_s$  отсутствует;  $в$  — параметр  $q_{гд}$  определяется в области  $q_{ф} < 1$  ом·м, имеется фильтрационная компонента  $E_s$  при  $q_{ф} > 1$  ом·м;

1 — график диффузионной э. д. с., 2 — график  $E_{да} = f(\lg q_{ф})$  для идеальной мембраны, 3 — график  $E_{да} = f(\lg q_{ф})$  для различных  $q = \text{const}$  (шифр кривых), 4 — точки, полученные в результате обработки диаграмм  $U_{СП}$ , 5 — график осреднения точек; 6 — линия глин, 7 — линия чистых, неглинистых песчаников (известняков), 8 — кривая  $U_{СП}$ .

Однако, начиная с определенного  $q_p^*$  при значениях  $q_\phi > q_p^*$ , точки закономерно отходят вверх от указанного графика, причем этот отход тем выше, чем больше  $q_\phi$  (рис. 65, в). Причиной подобного расхождения, как правило, является наличие э. д. с. фильтрационного происхождения или реже влияние химического состава фильтрата бурового раствора и пластовых вод (см. гл. I).

### § 19. ПОЛЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ Э. Д. С.

Для классического случая залегания песчаного коллектора в толще глин при наличии разности между гидростатическим давлением бурового раствора  $p_c$  на уровне пласта и пластовым давлением будут наблюдаться фильтрационные э. д. с.  $E'_\phi$  на контакте скважины с коллектором и  $E''_\phi$  — с вмещающими породами. В большинстве случаев при этом раствор в скважине имеет знак «минус», поскольку обычно  $p_c > p_{пл}$  и  $\zeta$ -потенциал отрицателен. Внешняя заряженная поверхность соответствует месту выхода фильтрата бурового раствора, которое для глин условно можно расположить в непосредственной близости от стенки скважины, так как весь перепад давлений  $p_c - p_{пл}$  соответствует очень тонкому цилиндрическому слою глин, примыкающему к скважине. В коллекторе при бурении на глинистом растворе все падение давления  $p_c - p_{пл}$  также придется на глинистую корку. Поэтому при небольшой толщине корки можно считать, что в результате фильтрации жидкости в коллектор возникает двойной слой, скачок которого равен  $E'_\phi$ . На контакте скважины с глиной возникает двойной слой фильтрационного происхождения со скачком  $E_\phi$ , хотя никакой фильтрации жидкости в глины не происходит<sup>1</sup> [87]. Следовательно, при бурении на глинистом растворе возникают цилиндрические двойные слои фильтрационного происхождения на границе скважины с коллектором и вмещающими породами. На границе коллектора с вмещающими породами фильтрационные э. д. с. практически не должны возникать даже при наличии большого перепада давлений (аномально высокое пластовое давление в коллекторе или более низкое давление в частично выработанном коллекторе), так как минерализация пластовых вод обычно высока.

Алгебраическая сумма э. д. с.  $E'_\phi$  и  $E''_\phi$  в замкнутом контуре составит:

$$\Delta E_\phi = E'_\phi - E''_\phi \quad (153)$$

По аналогии с терминами для полей диффузионного происхождения  $\Delta E_\phi$  уместно назвать фильтрационной компонентой статической

<sup>1</sup> Возникновение потенциалов течения в глинах при отсутствии фильтрации мало вероятно. По-видимому, потенциалы, наблюдавшиеся некоторыми исследователями, имеют иную природу, возможно, связанную с процессом набухания глинистых частиц. (Прим. ред.)

амплитуды  $E_s$ ,  $E'_\phi$  и  $E''_\phi$  рассчитываются по формуле (118). Так:

$$E'_\phi = A_{\text{гл}} Q_\phi (p_c^1 - p_{\text{пл}}). \quad (154)$$

$$E''_\phi = A_{\text{гк}} Q_\phi (p_c - p_{\text{пл}}), \quad (155)$$

где  $A_{\text{гл}}$  и  $A_{\text{гк}}$  — коэффициенты фильтрационной активности глины и глинистой корки; смысл остальных обозначений ясен из предыдущего.

Принимая  $p_c - p_{\text{пл}} = \Delta p$  и подставляя значения  $E'_\phi$  и  $E''_\phi$  в (153), получим:

$$\Delta E_\phi = (A_{\text{гл}} - A_{\text{гк}}) Q_\phi \Delta p. \quad (156)$$

Поскольку обычно  $A_{\text{гл}} < A_{\text{гк}}$  (см. гл. I), и  $\Delta p > 0$ , значение  $\Delta E_\phi < 0$ , т. е. при фильтрации жидкости в пласт возникающая при этом фильтрационная компонента аномалии  $U_{\text{сн}}$  приводит к увеличению отрицательной аномалии.

Расчет поля с учетом фильтрационных э. д. с. в этом случае можно выполнить, подставив в выражение (136) вместо  $E_s$  сумму  $(E_s + \Delta E_\phi)$ .

При бурении на воде вследствие размывания глин, присутствующих в разрезе, в буровую жидкость переходит некоторое количество глинистого материала, способствующее глинизации стенок скважины против коллекторов. Однако возникающая при этом «глинистая корка» будет не столь совершенной, как при бурении на глинистом растворе, поэтому проницаемость ее, а также значение параметра  $A_{\text{гк}}$  в большинстве случаев, по-видимому, значительно выше, чем для обычной глинистой корки. Следствием этого будут два обстоятельства:

а) на корку придется лишь часть перепада давления  $\Delta p$ , «место выхода фильтрата» отодвинется в глубь коллектора и поле фильтрации нельзя будет рассматривать как поле двойного слоя;

б) ввиду высокого значения параметра  $A_{\text{п}}$  (удельная фильтрационная активность коллектора, которая будет играть заметную роль, поскольку часть перепада  $\Delta p$  придется на коллектор) по сравнению с  $A_{\text{гк}}$  фильтрационная компонента аномалии  $\Delta U$  резко возрастет, что приведет к появлению чрезмерно высоких (до 150 мв) отрицательных амплитуд на диаграмме  $U_{\text{сн}}$ . Последнее иногда встречается в промыслово-геофизической практике.

Расчет поля в этих условиях можно осуществить сначала для системы двойных слоев диффузионного происхождения и двойного слоя фильтрационного происхождения на границе с вмещающими породами, а затем для одинарных цилиндрических слоев фильтрационного происхождения в коллекторе, один из которых совпадает с границей скважины — пласт, а другой — расположен в пласте на некотором расстоянии от скважины, при этом используются формулы, приведенные в работе [28].

Как уже указывалось, параметр  $A_{гк}$  зависит не только от величин  $q_{\phi}$  и  $\Delta p$ , но в значительной мере определяется свойствами глинистого раствора (при использовании его в качестве промывочной жидкости). Поэтому для оценки величины фильтрационной компоненты статической амплитуды  $E_s$  в чистых коллекторах необходимо выяснить пределы изменения параметра  $A_{гк}$  измерением его на моделях глинистой корки из применяемых в данном районе буровых растворов. Учитывая изложенное в § 13 главы I, для типичных образцов глинистого раствора, применяемых при бурении, и типичных глин из разрезов нефтяных и газовых месторождений можно

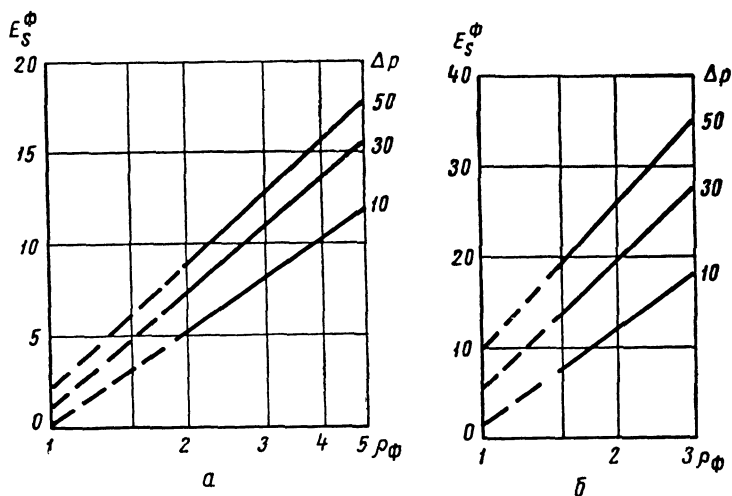


Рис. 66. Графики  $E_s^{\phi} = f(q_{\phi})$  для оценки величины фильтрационной компоненты аномалии  $\Delta U_{сн}$ .

Шифр кривых — перепад давлений  $\Delta p$  в ат.

а — обычный глинистый раствор; б — глинистый раствор, обработанный углекислым реагентом.

предложить для некоторых усредненных условий семейство графиков  $\Delta E_{\phi} = f(q_{\phi})$  с различным  $\Delta p = \text{const}$  (рис. 66, а и б). Данные рис. 66 позволяют удовлетворительно объяснить расхождение графика  $\Delta E_{сн} = f(q_{\phi})$ , составленного для чистых песчаников девона месторождений Татарии и Башкирии [33], с графиками  $E_{да} = f(\lg C_2)$  для различных  $q = \text{const}$  (рис. 66), если предположить, что для данных объектов  $\Delta p$  составляет 20—35 ат. Этот вывод совпадает с мнением И. Ю. Лепешинского. Приведенный фактический материал подтверждает также, что при  $q_{\phi} < 1$  ом·м фильтрационные э. д. с. практически отсутствуют.

Более полное изучение фильтрационных э. д. с. в скважине можно выполнить, производя регистрацию двух кривых  $U_{сн}$  при различном уровне жидкости в скважине [28, 62].

## § 20. ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ Э. Д. С. В СКВАЖИНАХ

В скважинах нефтяных и газовых месторождений возникают окислительно-восстановительные э. д. с. различного происхождения. На границе пород с электронной проводимостью и обсадных труб с раствором образуются потенциалы типа электродных. Наличие в породах и скважине теллурических токов, а также тока, питающего измерительную

установку при регистрации  $\rho_k$ , вызывает электролиз и вторичные сопутствующие процессы на поверхности тел с электронной проводимостью, образующих э. д. с.

Окислительно-восстановительные э. д. с. в породах обычно наблюдаются в зонах сульфидного оруденения, в частности, в сильно пиритизированных песчаниках или известняках, а также в каменных углях, в особенности высококарбонизированных, и в графите. Окислительно-восстановительные процессы приводят к образованию двойных слоев на границе пластов — скважина, а также в кровле и подошве пласта, поле которых рассчитывается так же, как и поле двойных слоев диффузионного происхождения. Перечис-

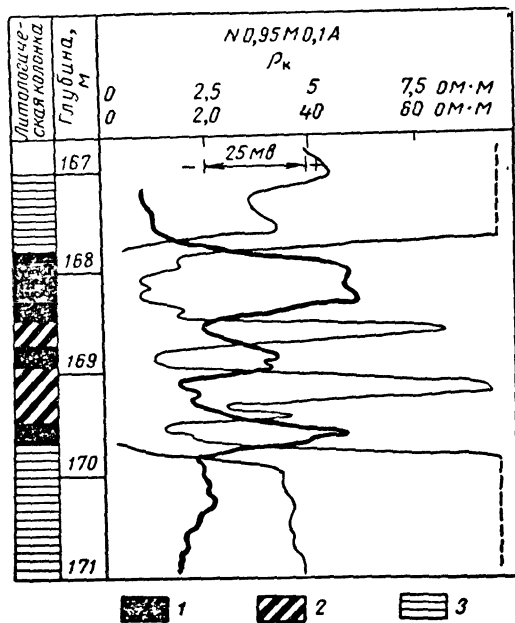


Рис. 67. Аномалии  $\Delta U_{СП}$  окислительно-восстановительного происхождения в пластах антрацита. Отложения карбона Восточного сектора Большого Донбасса.

1 — антрацит; 2 — углистый сланец; 3 — глинистый сланец.

ленные породы обычно окисляются кислородом воздуха, содержащегося в буровом растворе. В этом случае порода заряжается отрицательно, а скважина вблизи породы — положительно. В связи с этим окислительно-восстановительная поляризация, как правило, отмечается на диаграммах  $U_{СП}$  положительными аномалиями (рис. 67). В породах, содержащих пирит и углистые частицы в рассеянном состоянии, а также в бурых и каменных углях невысокой степени метаморфизма, значительных э. д. с. окислительно-восстановительного происхождения обычно не наблюдается.

Возможны случаи, когда окисляющие породы, обычно отмечаемые положительной аномалией  $\Delta U_{СП}$ , регистрируются аномалией

обратного знака. Это происходит в том случае, когда пласт изучается в зоне, где окислительные процессы сменяются восстановительными [28, 53].

Зная исследуемый разрез скважины, можно выявить аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  окислительно-восстановительного происхождения для соответствующих объектов и исключить их из рассмотрения.

Окислительно-восстановительные э. д. с. возникают также на поверхности обсадных труб и различных металлических предметов, спущенных в скважину. Башмак обсадной колонны, а также куски обсадных, бурильных труб и других металлических предметов обычно отмечаются крупной положительной аномалией на кривой  $U_{\text{СП}}$ . Однако нередко случаи, когда башмак колонны отмечается и уменьшением потенциала  $U_{\text{СП}}$ . Причиной этого может быть более интенсивное окисление труб на устье скважины, при этом скачок окислительно-восстановительного потенциала в нижней части колонны будет меньше, чем в верхней части, и электрод  $M$  зафиксирует более низкий потенциал, чем электрод  $N$ , находящийся близ устья.

Исследования, выполненные А. И. Заборовским, Л. П. Долиной и впоследствии В. М. Соколовым, указывают на некоторые возможности использования диаграмм  $U_{\text{СП}}$ , зарегистрированных в колонне. Поскольку интенсивность коррозии труб и других процессов, приводящих к возникновению окислительно-восстановительных э. д. с., в известной степени зависит от естественных электрических полей пород за колонной, то можно ожидать, что кривая  $U_{\text{СП}}$  в колонне при благоприятных условиях будет в той или иной степени отражать особенности геологического разреза обсаженной части скважины.

Для изучения разрезов скважин предложен метод, связанный с регистрацией кривых  $U_{\text{СП}}$  после промывки скважины раствором, содержащим окислитель. В качестве окислителей рекомендованы хромик [27] и хлорорганические соединения, которые при гидролизе выделяют атомарный кислород [7, 85]. В этом случае вначале регистрируют кривую  $U_{\text{СП}}$  при обычных условиях, затем вторую кривую после промывки скважины активированным раствором. Сопоставление кривых позволяет выделить в разрезе объекты, подвергающиеся окислению, в интервалах существенного изменения показаний СП. Метод дает положительные результаты при поисках рудных и угольных объектов, но, по-видимому, мало перспективен при изучении разрезов нефтяных и газовых месторождений.

## § 21. ИСКАЖЕНИЯ ДИАГРАММ ПОТЕНЦИАЛОВ СОБСТВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В СКВАЖИНЕ

Существует много различных факторов, искажающих кривые  $U_{\text{СП}}$ , что затрудняет, а иногда и исключает их эффективное использование. Рассмотрим наиболее распространенные виды искажений диаграмм  $U_{\text{СП}}$ , причины, их вызывающие, и способы устранения.



## Блуждающие и теллурические токи

Обычно при наличии блуждающих и теллурических токов  $U_{\text{СП}}$  очень резко изменяются во времени, что отмечается при остановке зонда.

Блуждающие токи промышленных электрических установок наиболее часто наблюдаются вблизи электрифицированных железных дорог, в пределах крупных городов и промышленных центров.

Теллурические токи — земные электрические токи естественного происхождения, возникающие в результате различных физических процессов, например, ионизации верхних слоев стратосферы под действием солнечного и космического излучений и других причин [28, 69]. Для полей блуждающих и теллурических токов характерно интенсивное изменение их во времени и пространстве. Разность потенциалов, создаваемая этими полями между измерительными электродами  $M$  и  $N$ , пропорциональна расстоянию между электродами (при наличии вертикальной составляющей поля), среднему удельному сопротивлению среды между электродами и плотности тока. Наиболее заметно влияние переменных полей в скважинах, заполненных соленым буровым раствором ( $\rho_p < 0,2 \text{ ом} \cdot \text{м}$ ), разрез которых представлен высокоомными породами — известняками и доломитами, гидрохимическими отложениями (примеры — скважины Белоруссии, Иркутского амфитеатра). В этом случае в соответствии с законами распространения тока в неоднородной среде токовые линии переменного поля концентрируются в основном в стволе

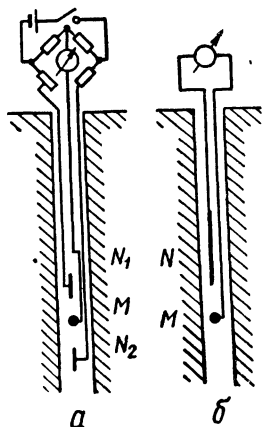


Рис. 68. Схемы измерения СП при наличии блуждающих и теллурических токов.

а — схема трехэлектродного зонда Дахнова — Дьяконова; б — стабильный зонд.

скважины, что приводит к резкому увеличению плотности тока и значения разности потенциалов  $\Delta U_{MN}^*$  переменного поля. Величины  $\Delta U_{MN}^*$  в отдельные промежутки времени могут в несколько раз превышать изменения потенциала электрода  $M$ , отражающие особенности разреза скважины, поэтому диаграмма  $U_{\text{СП}}$  при записи ее обычным способом в этих условиях совершенно непригодна для интерпретации.

В этом случае для получения качественных диаграмм  $U_{\text{СП}}$  рекомендуется один из следующих способов.

1. Применение специальных зондов — стабильного, трехэлектродного зонда Дахнова—Дьяконова. Основной особенностью этих зондов является использование «электрода сравнения»  $N$  больших размеров, находящегося в скважине вблизи от электрода  $M$ . Это

позволяет обеспечить практически стабильное значение среднего потенциала электрода  $N$  (большие размеры) и свести к минимуму переменную слагающую  $\Delta U_{MN}$  благодаря небольшому расстоянию между  $M$  и  $N$  (рис. 68). Подробно устройство этих зондов и работа с ними описаны в руководстве [28].

Следует отметить, что получаемые с этими зондами, особенно со стабильным зондом, кривые существенно отличаются от кривой  $U_{\text{сп}}$  и пригодны только для расчленения разреза и решения отдельных вопросов качественной интерпретации.

2. Регистрация диаграммы градиента  $U_{\text{сп}}$  при расстоянии  $MN \leq 1$  м между измерительными электродами с последующим интегрированием кривой графическим способом или с помощью специального устройства [57].

При сильном влиянии промышленных токов, а также при очень большом различии (более чем в 10 000 раз) в удельном сопротивлении скважины и пород не удастся получить качественной диаграммы  $U_{\text{сп}}$ , даже применяя специальные зонды.

### Влияние нестабильности электродного потенциала

В случае нестабильности электродного потенциала одного из электродов (в скважине или на поверхности) происходит систематическое смещение кривой с глубиной в сторону увеличения или уменьшения потенциала. Более вероятна нестабильность электродного потенциала электрода в скважине, которая может быть вызвана различными причинами: нарушением стабилизирующей пленки на поверхности электрода, притоком воды в скважину в определенном интервале, резким увеличением температуры с глубиной при высоком геотермическом градиенте, оседанием взвешенных в буровом растворе частиц породы вблизи забоя скважины. Применение свинцовых электродов при промыслово-геофизических исследованиях в скважине создает достаточно благоприятные условия для стабилизации электродного потенциала, поскольку свинец в среде, содержащей кислород, окисляется, покрываясь тонкой пленкой окиси свинца  $PbO_2$ , препятствующей дальнейшему окислению. Однако в отдельных случаях для получения качественных диаграмм  $U_{\text{сп}}$  необходимо применять специальные неполяризующиеся электроды, основной особенностью которых является окружение электрода концентрированным раствором соли с катионом, одноименным данному металлу ( $PbCl_2$ ,  $Pb(COON)_2$ ). Известно, что при этих условиях электродный потенциал будет наиболее стабилен. Для исследований, требующих особенно высокой стабильности электродного потенциала, целесообразно применять каломельные электроды.

### Влияние гальванокоррозии

Если груз или корпус зонда изготовлен из различных металлов, например, меди, железа или свинца, то возникают гальванические пары, создающие в скважине поле постоянного тока. При записи

кривой  $U_{\text{СП}}$  в этом случае будет регистрироваться сумма потенциалов естественного поля и поля постоянного тока гальванических элементов груза. Потенциал последнего отражает удельное сопротивление среды. Поэтому, если потенциалы гальванокоррозии груза существенно превышают потенциалы естественного поля, то вместо кривой  $U_{\text{СП}}$  регистрируется кривая сопротивлений. Основные средства борьбы — применение монометалльных грузов и корпусов зондов, отнесение груза на достаточное расстояние (не менее 2—3 м) от зонда, покрытие груза слоем резины или другого изолятора.

---

### ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДИАГРАММ ПОТЕНЦИАЛОВ СОБСТВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Диаграмма метода потенциалов собственной поляризации является одним из важнейших документов о разрезе скважины. Данные этого метода в комплексе с диаграммами других методов промысловой геофизики используются для литологического расчленения разрезов скважин. В терригенном разрезе при благоприятных условиях диаграммы  $U_{СП}$  используются также для определения коэффициента пористости коллекторов. В чистых неглинистых терригенных и карбонатных породах по диаграммам  $U_{СП}$  можно оценивать минерализацию пластовых вод. Кроме того, данные метода потенциалов собственной поляризации широко используются при корреляции разрезов скважин, анализе циклов седиментации, составлении карт фаций и при других работах по геологическому обобщению результатов промыслово-геофизических исследований.

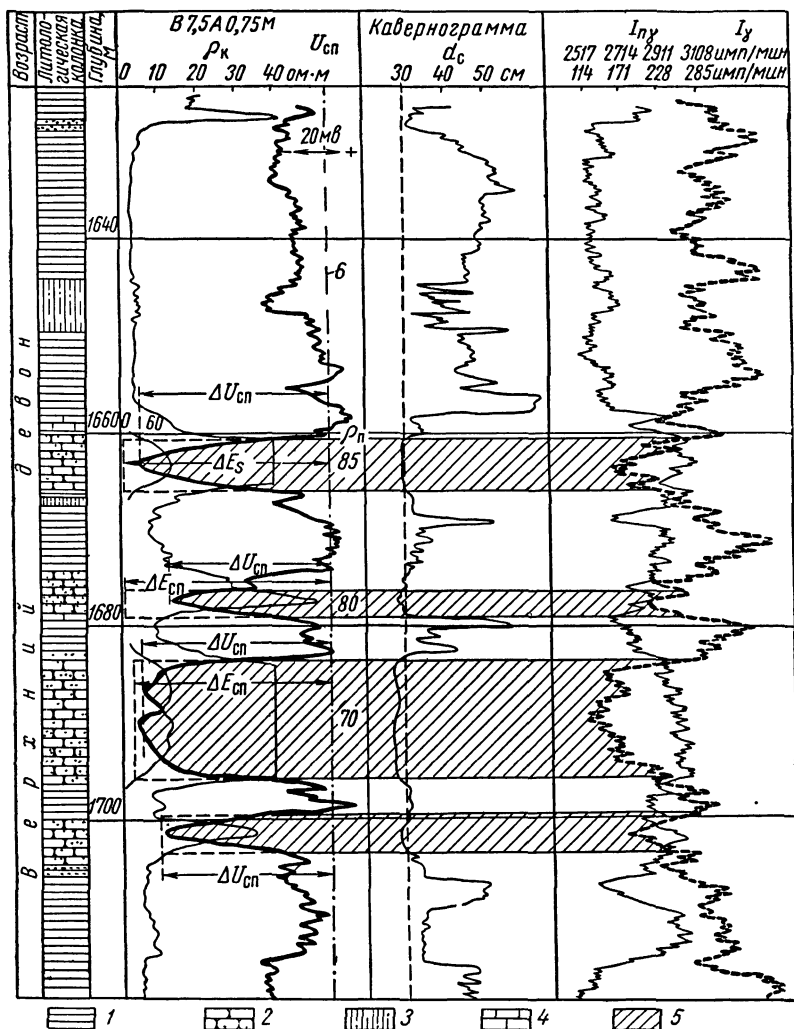
#### § 22. ОСНОВЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДИАГРАММ $U_{СП}$

##### Определение линии глин

Для интерпретации диаграммы  $U_{СП}$  необходимо, прежде всего, провести условную нулевую линию отсчета, за которую чаще всего принимают линию глин. Для этого необходимо знать минерализацию пластовых вод различных участков разреза и минерализацию бурового раствора в скважине. Если минерализация пластовых вод больше минерализации бурового раствора, линия глин обычно соответствует наиболее высоким значениям потенциала. В этих условиях в коллекторах и других породах с пониженным содержанием глинистого материала наблюдаются отрицательные аномалии  $\Delta U_{СП}$  (при обычно принятой полярности регистрации кривой  $U_{СП}$  отклонения влево<sup>1</sup>) (рис. 69). При обратном соотношении

<sup>1</sup> В районах Северного Кавказа (Грозный, Кубань, Ставрополь) принята обратная полярность записи кривой  $U_{СП}$ .

минерализаций линия глин соответствует минимальным значениям потенциала; в коллекторах и слабоглинистых породах в этом слу-



ис. 69. Расчленение разреза и выделение коллекторов по кривой  $U_{сп}$  с учетом диаграмм других методов в отложениях девона Ромашкинского месторождения.

1 — глина; 2 — песчаник; 3 — глинистый алевролит; 4 — известняк; 5 — коллекторы; 6 — линия глин.

чае потенциалы возрастают и кривая  $U_{сп}$  отклоняется вправо. Труднее определить положение линии глин, если минерализация пластовых вод изменяется по разрезу скважины. В этом случае

линию глин проводят отдельно для участков разреза, в пределах которых минерализация вод достаточно постоянна.

Изменение знака аномалий  $\Delta U_{\text{СП}}$  в коллекторах, насыщенных пресными водами, наблюдается на ряде месторождений Бухаро-Хивинской нефтегазоносной провинции (рис. 70), о-ва Сахалин и в других районах, однако для подавляющего большинства месторождений нефти и газа в продуктивных горизонтах и отложениях, перспективных в отношении нефтегазоносности, минерализация пластовых вод обычно выше минерализации бурового раствора. Поэтому в дальнейшем все вопросы интерпретации кривой потенциалов собственной поляризации будут рассматриваться в основном применительно к этим, наиболее типичным для практики условиям.

Линию глин следует проводить для отдельных ограниченных участков разреза, относящихся к одному и тому же горизонту, поскольку вследствие изменения дисперсности глинистых осадков в различных горизонтах линия глин может изменять свое положение. Классическим примером этого является контакт зеленых и малиновых глин в отложениях мезозойского возраста Ферганы [26].

При определении положения «линии глин» встречаются следующие затруднения.

1. Кривая  $U_{\text{СП}}$  на отдельных участках разреза или по всему разрезу постепенно смещается («ползет»), при этом смещается и линия

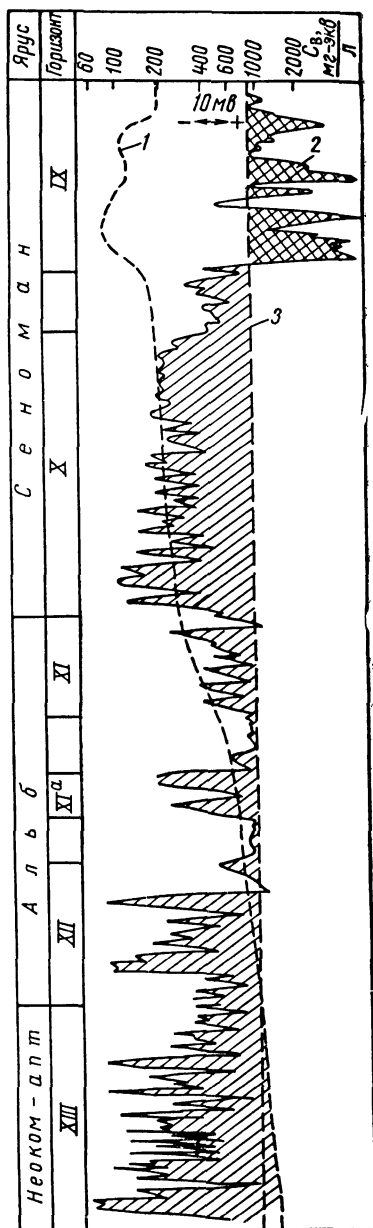


Рис. 70. Изменение знака аномалий  $U_{\text{СП}}$  относительно линии глин в разрезе с переменной минерализацией пластовых вод (по К. А. Грудкину). Песчано-глинистые отложения мезозоя месторождения Газли.

1 — график изменения минерализации вод с глубиной, 2 — кривая  $U_{\text{СП}}$ ; 3 — линия глин

глин. Причинами смещения могут быть поляризация электродов, приток пластовых вод в скважину, оседание частиц породы на забой («призабойный эффект»), влияние роста температуры с глубиной. Если сползание кривой превышает допустимые пределы, то диаграмму нельзя использовать для точной интерпретации. При допу-

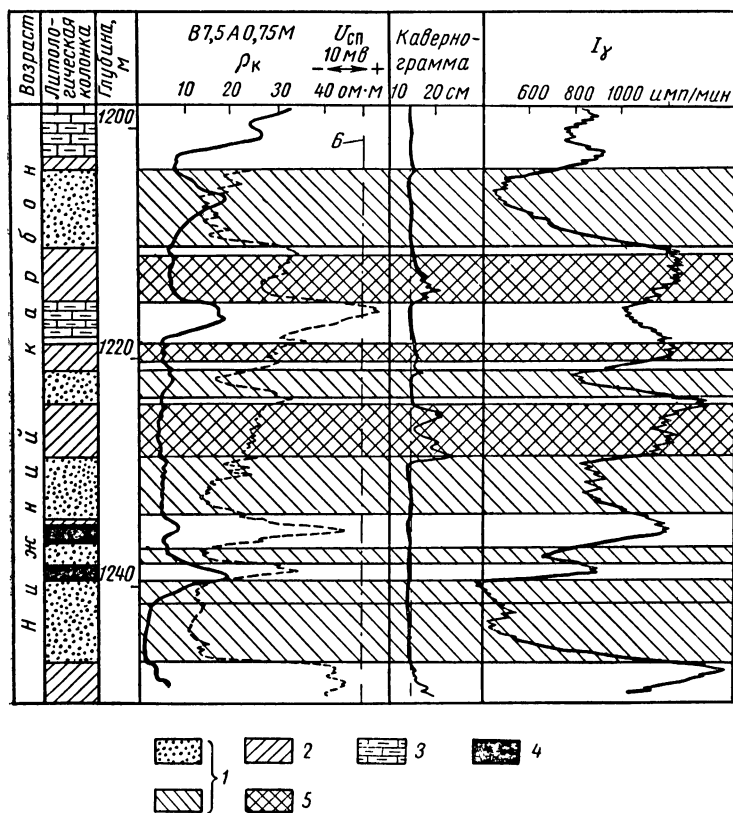


Рис. 71. Искажение кривой  $U_{СП}$  неоднородным составом жидкости в стволе скважины. Угленосные отложения Северной Башкирии.

1 — песчаный коллектор; 2 — глина; 3 — глинистый известняк; 4 — углистый сланец; 5 — участки кривой  $U_{СП}$  с аномальной характеристикой в пластах глин; 6 — линия глин.

стимом смещении линию глин на отдельных участках разреза проводят наклонной в соответствии с ходом кривой.

2. На кривой  $U_{СП}$  могут наблюдаться отдельные резкие смещения линии глин, обусловленные не изменением литологии разреза, а другими причинами: приближением к скважине законтурных вод (см. гл. II), изменением минерализации бурового раствора в скважине.

В этих случаях необходимо хорошо знать условия измерения  $U_{\text{СП}}$  в скважине и характеристику коллекторов в разрезе, чтобы правильно определить положение линии глин.

3. Участкам разреза, соответствующим глинам, при обычном соотношении минерализаций пластовых вод и бурового раствора соответствуют отрицательные аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$ . Это наблюдается при наличии в глинах каверн, наполненных цементом или более минерализованным буровым раствором, который заполнял скважину перед промывкой ее пресным раствором (рис. 74). В этом случае линию глин проводят по значениям потенциала в сильно глинистых породах с содержанием песчаного, алевроитового или карбонатного материала, которые по электрохимической активности мало отличаются от глин, но не размываются при бурении и характеризуются номинальным диаметром скважины.

При проведении линии глин необходимо исключать из рассмотрения пласты с аномально высокими значениями потенциала, которые могут соответствовать пиритизированным глинам, углям или углестым сланцам и т. п. Линия глин проводится по участкам кривой со стабильными показаниями  $U_{\text{СП}}$ .

Имеется также методика использования в качестве условной нулевой линии диаграммы  $U_{\text{СП}}$  прямой, проведенной по значениям потенциала в чистых, неглинистых пластах [29]. Эта методика пока не получила применения в практике интерпретации диаграмм  $U_{\text{СП}}$ .

### Выделение пластов, определение границ пластов и величины амплитуды аномалии $\Delta U_{\text{СП}}$

После того как проведена линия глин, приступают к определению границ пластов, являющихся объектами интерпретации.

Граница между двумя средами с различной электрохимической активностью в общем случае соответствует точке перегиба кривой  $U_{\text{СП}}$ . В мощном пласте с  $h_d > 30$  при  $\frac{q_{\text{п}}}{q_{\text{р}}} \leq 50$  границы пласта, отмечаемого аномалией  $U_{\text{СП}}$ , определяются точками кривой, где отклонение ее от линии глин составляет половину максимального. Чем меньше мощность пласта и больше отношение удельного сопротивления пласта  $q_{\text{п}}$  к удельному сопротивлению скважины и вмещающих пород, тем менее применимо это правило определения границ пласта по кривой  $U_{\text{СП}}$ . Мощность одиночных тонких пластов с отрицательной аномалией  $\Delta U_{\text{СП}}$  определяют по палетке, приведенной на рис. 72: вначале находят ширину аномалии  $h_{\text{ф}}$  на уровне половины максимальной амплитуды, затем для заданного  $q_{\text{п}}/q_{\text{р}}$  и известного  $h_{\text{ф}}$  находят величину  $h$ . Следует, однако, помнить, что эта палетка получена для условия  $q_{\text{п}} = \text{const}$ , тогда как в терригенном разрезе удельное сопротивление коллекторов обычно существенно отличается от удельного сопротивления вмещающих пород.



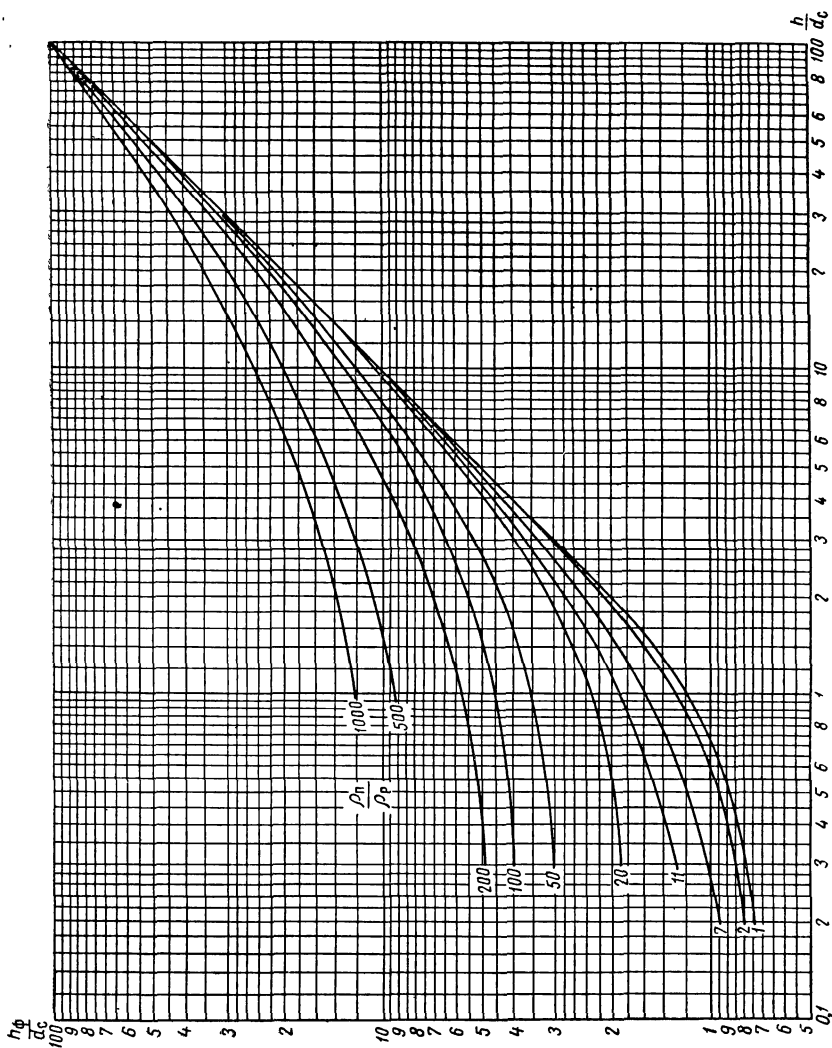


Рис. 72. Палетка для определения истинной мощности планета  $h$  по величине фактивной мощности  $h_\phi$ .

Шифр кривых —  $\frac{Q_\Pi}{Q_P}$   
(по данным [79]).

Затруднительно выделить тонкие глинистые прослои в высокоомных породах, отмечаемых общей отрицательной аномалией  $\Delta U_{\text{СП}}$ , в чистых известняках и доломитах, нефтегазоносных песчаниках и определить их границы. Особенно важно выделить такие прослои в последнем случае, поскольку они могут играть роль экрана, существенно влияя на распределение воды, нефти и газа в продуктивном горизонте. Вследствие влияния омического фактора такие прослои не всегда удается уверенно выделить по кривой  $U_{\text{СП}}$ . Для выделения

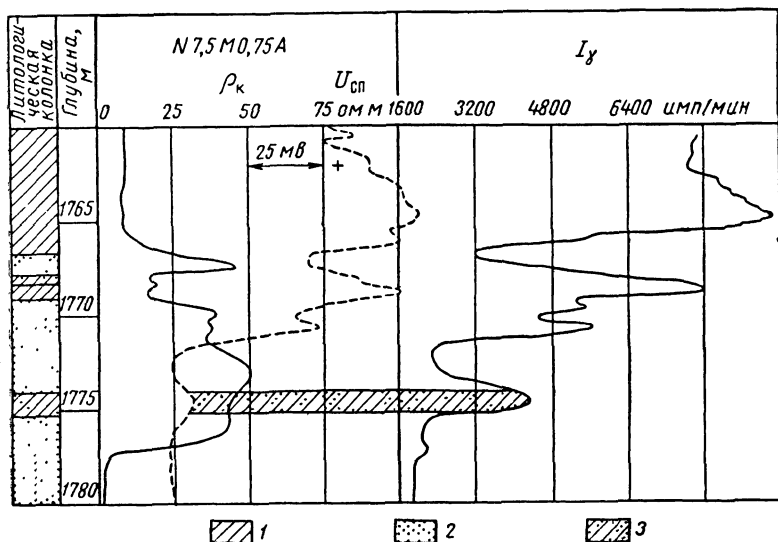


Рис. 73. Характеристика тонких глинистых прослоев в коллекторе на кривой  $U_{\text{СП}}$  и диаграмме  $I_{\gamma}$ , зарегистрированной трехканальным прибором Ю. А. Гулина, девонские отложения Туймазинского месторождения.

1 — песчаник; 2 — глинистый алевролит; 3 — глина.

пропластков глин в этом случае целесообразно использовать данные гамма-метода, если кривая  $I_{\gamma}$  зарегистрирована прибором со сцинтилляционными счетчиками при низкой скорости подъема зонда, разности сопротивлений заземления микрозондов (рис. 73), а также кавернограмму, записанную в масштабе глубин 1:1 или 1:2. В карбонатном разрезе тонкие прослои глин также лучше выделять по кавернограммам и диаграммам  $I_{\gamma}$ ; тонкие прослои глинистых известняков и доломитов обычно отмечаются нечетко. Для более надежного их выделения по данным метода потенциалов собственной поляризации следует регистрировать диаграмму  $U_{\text{СП}}$  с неполяризующимся электродом специальной конструкции, прижатым к стенке скважины, или кривую селективированных  $U_{\text{СП}}$  (рис. 61).

При частом чередовании в разрезе глинистых и слабоглинистых тонких прослоев по кривой  $U_{\text{СП}}$  можно определить только границы всей пачки, представленной таким чередованием (рис. 89).

Для количественной интерпретации данных метода потенциалов собственной поляризации используют амплитуду аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  для изучаемого пласта, величину которой определяют по отношению к линии глин. Прежде всего определяют амплитуду аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$ ,

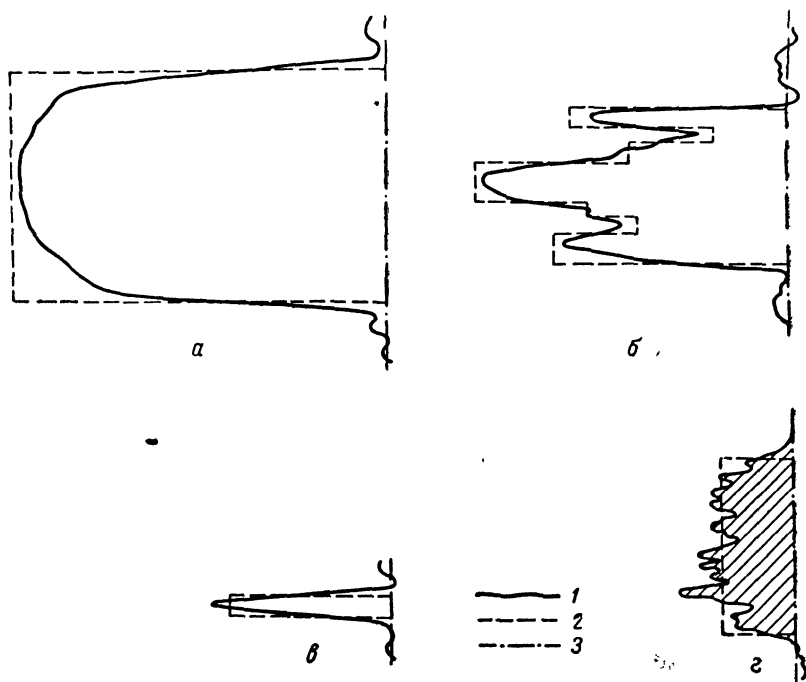


Рис. 74. Различные случаи определения амплитуды по диаграмме  $U_{\text{СП}}$ . а — мощный однородный пласт; б — неоднородный пласт; в — тонкий пласт (неправильное определение  $E_s$ ); г — пачка тонких пластов. 1 — график  $U_{\text{СП}}$ ; 2 — график  $E_s$ ; 3 — линия глин.

соответствующую фактическому отклонению кривой от линии глин. В однородном пласте независимо от его мощности величина  $\Delta U_{\text{СП}}$  соответствует максимальному отклонению кривой от линии глин в центре пласта (рис. 74, а). В неоднородном пласте в зависимости от решаемой задачи определяют или средневзвешенное значение  $\Delta U_{\text{СП}}$  в центральной части пласта, или значения  $\Delta U_{\text{СП}}$  для отдельных участков пласта (рис. 74, б). Грубой ошибкой является использование для интерпретации среднего значения  $\Delta U_{\text{СП}}$  в тонком пласте, определенного так, как это показано на рис. 74, в. При интерпретации аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  в неоднородных пластах и пачках помимо средне-

взвешенного значения амплитуды  $\Delta U_{\text{СП}}$  при определении суммарной мощности песчаных прослоев определяют также площадь аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$ , ограниченную кривой  $U_{\text{СП}}$  и линией глин в пределах, где наблюдается отклонение кривой от линии глин (рис. 74, з) [29].

Для количественной интерпретации диаграммы  $U_{\text{СП}}$ , как правило, недостаточно знания зарегистрированных амплитуд аномалии, кроме них необходимо определить статическое или приведенное значение потенциала  $E_s$ , которое освобождено от влияния омического фактора и геометрии среды. Величину  $\Delta U_{\text{СП}}^{\infty}(E_s)$  рассчитывают по формуле

$$E_s = \frac{\Delta U_{\text{СП}}}{v_{\text{СП}}}, \quad (157)$$

где значение  $v_{\text{СП}}$  берут для заданных условий по палеткам, изображенным на рис. 55. В общем случае, когда в породу проникает фильтрат бурового раствора и известны параметры пласта ( $q_{\text{п}}$ ), зоны проникновения ( $q_{\text{зп}}$ ,  $D$ ) вмещающих пород ( $q_{\text{вм}}$ ), значения  $d_c$  и  $h$ , для определения  $v_{\text{СП}}$  рекомендуется использовать палетки, опубликованные в работах [71] и [91] (рис. 55, 57). Если найденные значения  $q_{\text{зп}}/q_{\text{р}}$ ,  $D/d_c$  или  $q_{\text{вм}}/q_{\text{в}}$  не соответствуют указанным на палетках, проводят интерполяцию между значениями  $v_{\text{СП}}$ , определенными по соответствующим палеткам, с наиболее близкими значениями этих параметров [16]. Часто параметры  $q_{\text{зп}}$  и  $D$  в коллекторах нельзя определить с удовлетворительной точностью. В этих условиях использование неверных значений  $q_{\text{зп}}$  и  $D$  может привести к грубым ошибкам в определении значений  $v_{\text{СП}}$  и  $E_s$  и лучше находить  $v_{\text{СП}}$  по палеткам с кривыми  $v_{\text{СП}} = f(h/d_c)$  для различных  $q_{\text{п}}/q_{\text{р}} = \text{const}$  при фиксированном значении  $q_{\text{зп}}/q_{\text{р}}$  (рис. 55). При этом в качестве  $q_{\text{п}}$  следует принимать то значение  $q$ , которое удастся определить по данным метода сопротивлений.

Абсолютное значение  $E_s$  приведенной (статической) амплитуды  $\Delta U_{\text{СП}}$  отражает не только особенности разреза (литологию, минерализацию пластовых вод), но также и влияние других факторов, связанных с условиями измерения, минерализацией и химическим составом бурового раствора, горизонтальным масштабом записи, не соответствующим указанному на диаграмме. Поэтому для характеристики разреза скважины в ряде случаев удобнее использовать относительную амплитуду аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$ , вычисляемую по формуле

$$\mathfrak{M} = \frac{E_s}{E_s^{\text{max}}}, \quad (158)$$

где  $E_s^{\text{max}}$  — приведенная амплитуда аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  в чистой неглинистой породе (известняк, алевролит или песчаник);  $E_s$  — приведенная амплитуда в интерпретируемом пласте. Обычно  $\mathfrak{M} \leq 1$ . При расчете значений  $\mathfrak{M}$  необходимо иметь в виду следующее.

1. Пласты, для которых рассчитывается значение  $\mathfrak{M}$ , и опорный пласт с максимальной амплитудой  $E_s^{\max}$  должны относиться к толще пород с одинаковыми минерализацией и составом пластовых вод, стабильной линией глин и небольшим до  $10^\circ \text{C}$  изменением температуры в пределах горизонта.

2. Опорный пласт должен быть хорошо выдержанным по площади, на которой проводится анализ диаграмм  $U_{\text{СП}}$ , и не содержать (или содержать в небольшом количестве  $\eta \leq 0,1$  для песчаников) глинистый или другой высокодисперсный материал.

Если в пределах данного горизонта опорный пласт отсутствует, то в качестве опорного используют пласт с соответствующей характеристикой в отложениях, расположенных выше или ниже; при этом должны соблюдаться условия, указанные в п. 1.

При отсутствии такой возможности в качестве опорного можно взять пласт с выдержанной по площади литологией и хорошо изученными по данным керна, который можно характеризовать определенными значениями параметров  $q_n$  и  $\eta$  [32]. При этом значение относительной амплитуды рассчитывают по формуле

$$\mathfrak{M}_1 = \frac{E_s}{E_{s1}}, \quad (159)$$

где  $\mathfrak{M}$  — амплитуда в опорном пласте, причем  $E_s < E_s^{\max}$ .

Можно использовать и другой путь — вычислить или определить по соответствующим палеткам значение  $E_s^{\max}$ , зная характеристику глин, температуру и минерализацию вод данного горизонта, а затем использовать это значение для расчета  $\mathfrak{M}$  по формуле (158).

### Влияние на амплитуду $\Delta U_{\text{СП}}$ фактора времени и нефтегазонасыщенности породы

Для обеспечения надежных результатов количественной интерпретации диаграмм  $U_{\text{СП}}$  важно использовать стабильное значение относительной или абсолютной амплитуды аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$ , отражающее только особенности разреза скважины, в первую очередь его литологию и коллекторские свойства. Однако даже приведенное значение амплитуды аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$ , в значительной степени освобожденное от влияния посторонних факторов, зависит не только от свойств разреза.

Замечено, что амплитуда аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  в коллекторах заметно меняется во времени, причем известны примеры как роста амплитуды аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  во времени, так и ее уменьшения (рис. 75). При постоынной минерализации бурового раствора основной причиной изменения во времени  $\Delta U_{\text{СП}}$  является фильтрация жидкости из скважины в пласты-коллекторы, которая оказывает влияние на величину  $E_s$ , во-первых, изменяя во времени параметры зоны проникновения —  $D$ ,  $q_{\text{вп}}$ , что приводит к изменению соотношения между фактической и приведенной амплитудой аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$ ; во-вторых,

изменяя величину той части амплитуды, которая определяется фильтрационными э. д. с.

При обычных условиях исследований в скважине (пресный буровой раствор, минерализованные пластовые воды) параметры  $D$  и  $Q_{сп}$  растут во времени, что приводит к соответствующему уменьшению амплитуды аномалии  $\Delta U_{сп}$  и снижению дифференциации кривой  $U_{сп}$  в целом. Особенно наглядно это видно при исследовании карбонатных разрезов, где кривая  $U_{сп}$ , полученная вскоре после

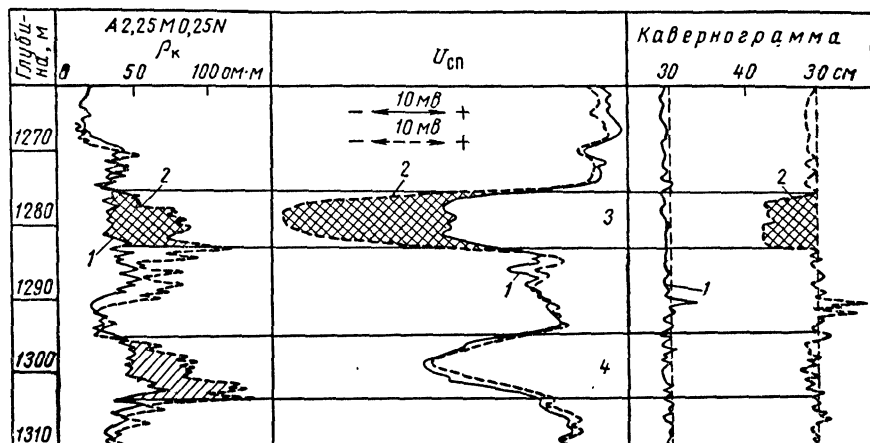


Рис. 75. Пример измерения во времени величины аномалии  $\Delta U_{сп}$ . Известняки верхнего мела Тарханкутского п-ова (по данным Л. М. Федина, Крымская геофизическая экспедиция).

1 — 4/VIII 1962 г.; 2 — 21/IX 1962 г. ( $Q_p = 2,6$  см·м); 3 — коллектор с резким изменением во времени амплитуды  $\Delta U_{сп}$ ; 4 — коллектор.

вскрытия пород, показывает значительно четче расчленение разреза, чем кривая, зарегистрированная спустя продолжительное время (недели и месяцы) после первого замера (рис. 75).

Значительно реже наблюдается увеличение амплитуды аномалии  $\Delta U_{сп}$  во времени. Обычно оно соответствует хорошим коллекторам в терригенном или карбонатном разрезе, против которых образуется толстая глинистая корка (последнее означает также низкое качество глинистого раствора) (рис. 75). По-видимому, в этом случае решающее значение имеет резкое увеличение во времени фильтрационной компоненты величины  $\Delta U_{сп}$ , связанное с соответствующим изменением свойств глинистой корки. Коллимационная зона и внутренний слой глинистой корки, формирующиеся в начале фильтрации, относительно лучше уплотнены, поэтому имеют сравнительно высокое значение параметра  $q$ , что обуславливает в соответствии с изложенным в главе I небольшую величину  $\Delta E_f$ . В дальнейшем формируются внешние слои глинистой корки, составляющие большую часть ее толщины. Они уплотнены значительно меньше, имеют более низкий

параметр  $q$ , следовательно, значение  $\Delta E_{\text{ф}}$  при сохранении прочих условий ( $\Delta p$ ,  $q_{\text{ф}}$ ) постоянными должно возрасти<sup>1</sup>.

Роль фильтрационных э. д. с. в определении вида кривой  $U_{\text{СП}}$  особенно возрастает в скважинах, бурящихся на растворах с  $q_{\text{ф}} > 1 \text{ ом} \cdot \text{м}$ , так как в этом случае резко возрастает  $\zeta$ -потенциал корки.

Как уже указывалось выше, влияние нефтегазонасыщения на амплитуду аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  сказывается за счет повышения сопротивления коллектора и изменения его диффузионно-адсорбционной активности.

Влияние первого фактора исключается при переходе к приведенной амплитуде аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$ . Влияние сопротивления приводит к уменьшению амплитуды аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  в нефтегазонасыщенном пласте по сравнению с водоносным. Однако наблюдаются случаи, когда в нефтенасыщенной части чистого коллектора амплитуда аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  больше, чем в водонасыщенной. Это можно объяснить более глубоким проникновением фильтрата бурового раствора в водоносную часть пласта; при определенном соотношении значений диаметра  $D$  зоны проникновения в водоносной и нефтеносной частях пласта влияние глубины проникновения может оказаться сильнее влияния удельного сопротивления неизменной части пласта. На приведенную амплитуду аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  должны влиять в основном только изменения диффузионно-адсорбционной активности нефтегазонасыщенного пласта. В чистом коллекторе диффузионно-адсорбционная активность не зависит от степени водонасыщения породы. В глинистом коллекторе диффузионно-адсорбционная активность возрастает под влиянием нефтегазонасыщения, что приводит к уменьшению фактической и приведенной амплитуды аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$ . Однако в последнем случае этот эффект несколько ослаблен за счет наличия барьера минерализованной пластовой воды, окаймляющего зону проникновения, поэтому влияние нефтенасыщения на приведенную амплитуду аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  в глинистом коллекторе меньше, чем это можно было бы ожидать, исходя из петрофизических соображений.

## § 23. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАГРАММ $U_{\text{СП}}$ ДЛЯ ЛИТОЛОГИЧЕСКОГО РАСЧЛЕНЕНИЯ РАЗРЕЗА

### Терригенный разрез

В терригенном разрезе при незначительном изменении минерализации пластовых вод в исследуемом интервале по диаграммам  $U_{\text{СП}}$  выделяются породы неглинистые и слабо глинистые, глины и сильно

<sup>1</sup> Это объяснение автора недостаточно убедительно, так как образование внешних слабо уплотненных слоев глинистой корки не может значительно изменить потенциал  $E_{\text{ф}}$ . (Прим. ред.)

глинистые породы и, наконец, литологические разности, составляющие промежуточную группу (породы со средней степенью глинизации).

Породы первой группы отмечаются максимальным отклонением кривой  $U_{\text{СП}}$  влево от линии глин (при  $\epsilon_{\text{ф}} > \epsilon_{\text{в}}$ ). К ним относятся:

а) чистые и слабо глинистые песчаники и пески, алевролиты и алевриты;

б) песчаники и алевролиты с карбонатным цементом, а также кварциты и кварцитоподобные сливные песчаники с силикатным цементом;

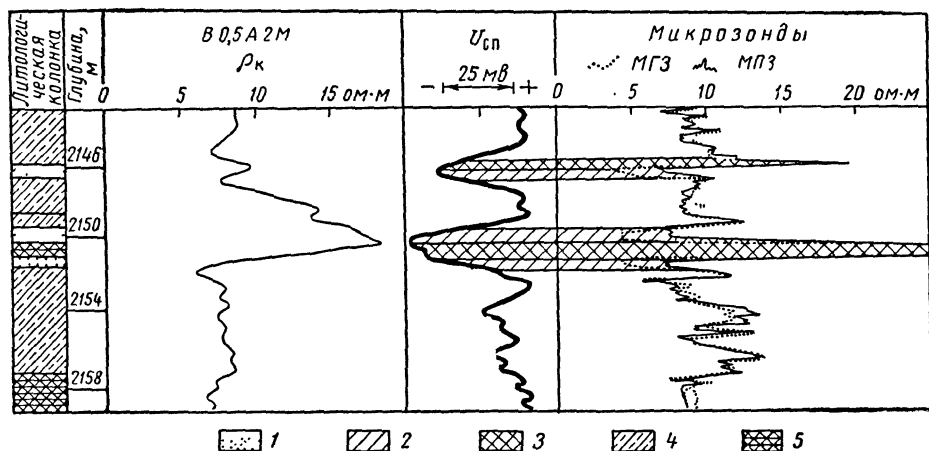


Рис. 76. Сравнительная характеристика песчаников с глинистым и карбонатным цементом (по Е. И. Леонову, СНИИГИМС). Песчано-глинистые отложения мезозоя Западной Сибири.

1 — песчаник; 2 — коллектор; 3 — песчаник с карбонатным цементом, неколлектор; 4 — глинистый алевролит или песчаная глина; 5 — глина.

в) в терригенно-карбонатном разрезе — чистые известняки и доломиты. Если представители первой подгруппы обычно являются хорошими коллекторами, то породы, относящиеся к последним двум подгруппам, часто являются плохими коллекторами или неколлекторами (рис. 68).

Пласты, отмечаемые максимальной аномалией  $\Delta U_{\text{СП}}$ , можно разделить на коллекторы и неколлекторы (плохие коллекторы), используя данные метода: микросондов, нейтронного гамма-метода ( $I_{\text{нγ}}$ ). Так, плотные песчаники с карбонатным цементом в отличие от пористых чистых песчаников отличаются высокими показаниями на диаграммах микросондов (рис. 76) и  $I_{\text{нγ}}$ .

Породы второй группы соответствуют интервалам, где показания на кривой  $U_{\text{СП}}$  совпадают с линией глин или близки к ней. Обычно это чистые глины или сильно глинистые алевролиты, глинистый цемент которых как по минералогическому составу, так и по степени



уплотнения мало отличается от вмещающих глин. В терригенно-карбонатном разрезе максимальными значениями потенциала могут отмечаться также мергели, глинистые известняки и доломиты. Все эти породы обычно являются неколлекторами. Отличить указанные литологические разности, имеющие одинаковую характеристику на диаграммах  $U_{\text{СП}}$ , можно с помощью диаграмм микрозондов, каверномера и гамма-метода.

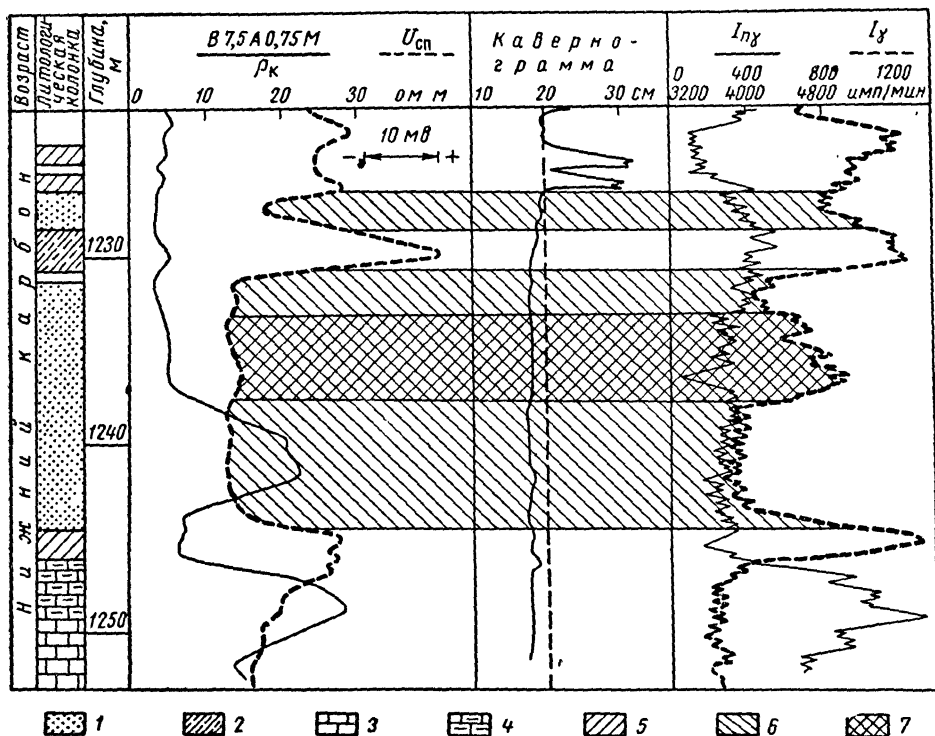


Рис. 77. Характеристика коллектора, представленного полимиктовым песчанником. Угленосная свита месторождения Юсупово Северной Башкирии.

1 — песчаник; 2 — глинистый алевролит; 3 — известняк; 4 — глинистый известняк; 5 — глина; 6 — коллектор; 7 — коллектор с аномальной характеристикой по  $I_{\gamma}$ .

Породы третьей группы характеризуются промежуточными показаниями  $U_{\text{СП}}$ . К ней принадлежат песчаники и алевролиты с глинистым и глинисто-карбонатным цементом и вообще все литологические разности с промежуточными значениями относительной глинистости.

Известно, что другим методом, характеризующим глинистость разреза, является гамма-метод. В терригенном разрезе диаграммы  $U_{\text{СП}}$  и  $I_{\gamma}$  нередко весьма похожи и дают примерно одинаковые сведения о разрезе (рис. 69). Это позволяет использовать диаграммы  $I_{\gamma}$  вместо диаграмм  $\Delta U_{\text{СП}}$ , однако, встречаются случаи и существенного

отличия формы кривых  $U_{\text{СП}}$  и  $I_{\gamma}$ . Наиболее типичными из них являются следующие.

1. Полимиктовые (аркозовые) песчаники и алевролиты с низким содержанием глинистого материала (обычно каолинит) отмечаются на диаграммах  $U_{\text{СП}}$  максимальной отрицательной амплитудой так же, как и чистые кварцевые песчаники и алевролиты. На диаграммах  $I_{\gamma}$  полимиктовые песчаники в отличие от кварцевых характеризуются несколько повышенной естественной радиоактивностью благодаря наличию в них калия. Такие показания могут быть неправильно истолкованы как признак увеличения глинистости (рис. 77).

2. Участки разреза, которым соответствует на кривой  $U_{\text{СП}}$  линия глин, часто дифференцируются на диаграмме  $I_{\gamma}$ . Это связано с тем, что диффузионно-адсорбционная активность терригенных пород, тесно связанная с параметром  $\eta$ , не изменяется с ростом глинистости, если последняя превышает некоторое критическое значение (см. гл. I), тогда как гамма-активность растет с увеличением глинистости практически во всем диапазоне изменения глинистости, будучи наиболее тесно связанной с параметром  $K_{\text{ГЛ}}$  [16]. Таким образом, по диаграммам гамма-метода можно отличить чистые глины от сильно глинистых песчаников или песчаных глин (рис. 69, 77).

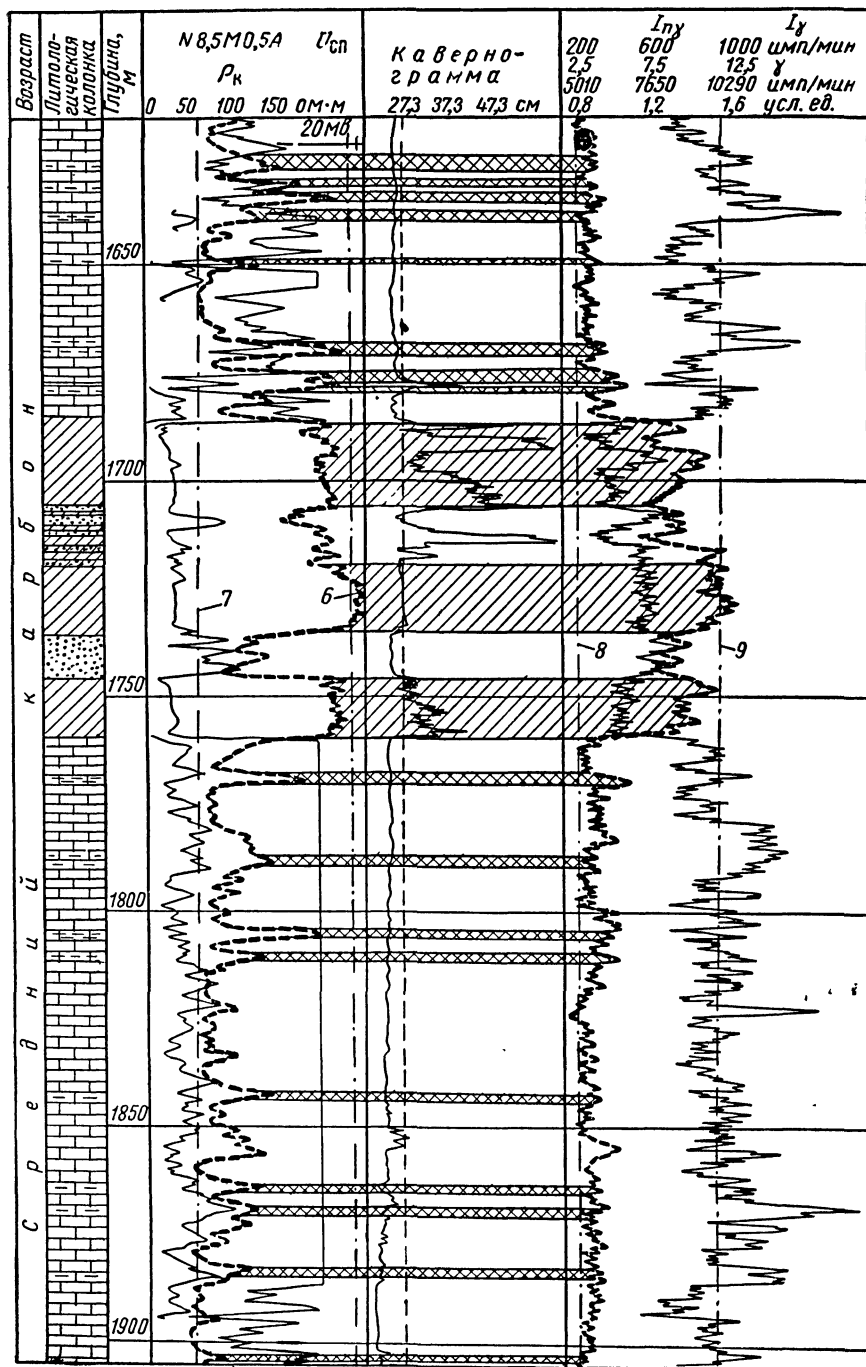
Кроме того, в однородных с точки зрения метода потенциалов собственной поляризации толщах глин на диаграммах  $I_{\gamma}$  нередко отмечаются участки с резко повышенной (до 2—3 раз) гамма-активностью. Такие участки могут быть представлены некоторыми битуминозными глинами или аргиллитами.

Примеры литологического расчленения терригенного разреза по диаграммам  $U_{\text{СП}}$ ,  $I_{\gamma}$  и других геофизических методов приведены на рис. 69, 77.

### Карбонатный разрез

В карбонатном разрезе по данным метода потенциалов собственной поляризации можно выделить те же три группы пород, что и в терригенном. Чистым известнякам и доломитам независимо от их пористости и других коллекторских свойств соответствуют минимальные значения  $U_{\text{СП}}$ . Максимальные значения  $U_{\text{СП}}$  в карбонатном разрезе соответствуют породам с максимальной относительной глинистостью. Объемная глинистость  $K_{\text{ГЛ}}$  таких пород при этом может изменяться от нескольких процентов в плотных известняках и доломитах с низкой пористостью до десятков процентов в мергелях, карбонатных глинах, достигая максимума в глинах. Таким образом, в карбонатном разрезе при изменении глинистости в довольно широком диапазоне значения потенциала  $U_{\text{СП}}$  могут оставаться неизменными, соответствующими линии глин.

Известняки и доломиты с различной объемной  $K_{\text{ГЛ}}$  и одинаковой относительной глинистостью  $\eta$  будут иметь различную характеристику по диаграммам  $I_{\gamma}$ , в частности, отдельные прослои с низким



1



2



3



4



5

$K_{г\lambda}$ , выделяемые на кривой  $U_{\text{СП}}$  максимальным значением потенциала, могут на диаграмме  $I_{\gamma}$  почти не отличаться от вмещающих их чистых известняков (рис. 78).

Промежуточные показания на диаграмме  $U_{\text{СП}}$  соответствуют в карбонатном разрезе известнякам и доломитам со средними значениями относительной глинистости. В большей части карбонатных разрезов породы с промежуточными показаниями  $U_{\text{СП}}$  составляют небольшую часть разреза, например, для отложений палеозоя Волго-Уральской нефтегазоносной провинции.

## § 24. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ПЛАСТОВЫХ ВОД

Определение минерализации пластовых вод по диаграммам  $U_{\text{СП}}$  возможно при наличии следующих благоприятных условий:

- а) изучаемый разрез представлен чистыми неглинистыми пластами или пластами с известным значением  $A_{\text{да}}$  или параметра  $q_{\text{п}}$ ;
- б) амплитуда  $\Delta U_{\text{СП}}$  в этих пластах обусловлена э. д. с. только диффузионного происхождения (если фильтрационная компонента и имеется, то величина ее незначительна или ее можно учесть);
- в) минерализация пластовых вод не превышает 50—80 г/л.

По диаграммам  $U_{\text{СП}}$  определяют обычно удельное сопротивление  $q_{\text{в}}$  пластовых вод, позволяющее затем рассчитать величину  $C_{\text{в}}$ .

В упрощенном варианте определение  $q_{\text{в}}$  проводится по следующей схеме [95].

1. В пределах изучаемого горизонта в разрезе скважины выделяют чистый неглинистый пласт песчаника или, в крайнем случае, известняка. Желательно, чтобы пласт был водоносным.

2. Находят фактическую  $\Delta U_{\text{СП}}$  и приведенную  $E_s$  амплитуды аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  в этом пласте.

3. Зная температуру  $t$  на глубине пласта и полагая, что при  $t = 18^\circ \text{C}$  коэффициент  $K_{\text{СП}} = 69,4 \text{ мв}$  (случай контакта чистой породы и идеально адсорбирующей глины), рассчитывают значение  $K_{\text{СП}}$  при температуре пласта по формуле (9) с подстановкой  $K_{\text{СП}} 18^\circ \text{C}$  вместо  $K_{\text{д}} 18^\circ \text{C}$ .

4. По известным палеткам, зная  $q_{\text{р}}$ ,  $t$ , отыскивают удельное сопротивление фильтрата бурового раствора  $q_{\text{ф}}$  [16].

5. Зная  $E_s$ ,  $K_{\text{СП}}$ ,  $q_{\text{ф}}$ , решают уравнение (150) относительно неизвестного  $q_{\text{в}}$ . Кроме того, найти  $q_{\text{в}}$  можно по палетке (рис. 79).

Рис. 78. Расчленение карбонатных и терригенных отложений верхнего и среднего карбона месторождения Могутово (Оренбургская область) по кривым  $U_{\text{СП}}$ ,  $I_{\gamma}$  с учетом данных других методов.

1 — известняк; 2 — глинистый известняк; 3 — песчаник; 4 — глина; 5 — карбонатные породы с низкой объемной и высокой относительной глинистостью; 6, 7 — линии глин и чистых известняков на диаграмме  $U_{\text{СП}}$ ; 8, 9 — то же, на диаграмме  $I_{\gamma}$ .

В рассмотренном варианте имеется в виду редкий в практике случай, так как даже плотные глины обычно не обладают предельной диффузионно-адсорбционной активностью, поэтому при  $t = 18^\circ \text{C}$  величина  $K_{\text{СП}}$  обычно меньше 69,4 мв. Иногда вместо этого значения  $K_{\text{СП}}$  берут величину  $K_{\text{СП}}$  при  $t = 18^\circ \text{C}$  в пределах от 50 до 70 мв, учитывая, что глина не является «совершенной мембраной», а песчаник не вполне свободен от глинистых примесей.

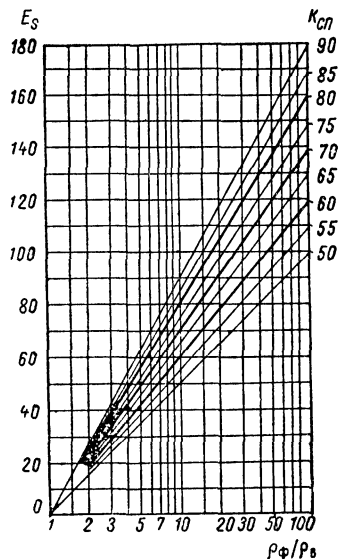


Рис. 79. Палетка для определения  $q_v$  и  $C_v$  в неглинистом пласте по диаграмме  $U_{\text{СП}}$  при упрощенном варианте.  
Шифр кривых — значения  $K_{\text{СП}}$ .

Для более точного определения величины  $q_v$  необходимо знать характеристику глин или глинистых пород, вмещающих данный пласт. Это может быть выполнено в том случае, если в исследуемом разрезе имеются чистые (не глинистые) песчаные коллекторы. При выполнении этого условия поступают следующим образом.

1. По нескольким скважинам определяют значение  $E_s$  в чистых неглинистых пластах при различном удельном сопротивлении  $q_p$  раствора в скважине; если в одной скважине проведены два-три измерения  $U_{\text{СП}}$  при различном  $q_p$ , можно ограничиться данными этой скважины.

2. Известным способом находят величину  $q_\Phi$  для каждого случая, после чего, зная температуру пластов, приводят значения  $E_s$  и  $q_\Phi$  к стандартной температуре, например, к температуре  $18^\circ \text{C}$ . Затем составляют график  $E_s = f(q_\Phi)$ .

3. Используя графики  $E_s^{\text{max}} = f(q_\Phi)$  для различных  $q_{\text{гЛ}} = \text{const}$  и  $q_v = \text{const}$  (рис. 80), составленные по данным палетки, представленной на рис. 7, подбирают такой расчетный график, который наилучшим образом совпадает с фактическим. В дальнейшем этот график используется как предельный, по которому рассчитывается  $\lg \frac{q_\Phi}{q_v}$  для заданного  $\Delta U_{\text{СП}}$ .

Значение  $q_{\text{гЛ}}$  можно определить также экспериментально на образцах глин, взятых из разрезов скважин, учитывая возможное изменение пористости глин при переходе от условий естественного залегания к лабораторным условиям [формула (29)].

В литературе рекомендуются также и другие варианты определения  $q_{\text{гЛ}}$  [83]. Зная  $q_{\text{гЛ}}$ , выбираем соответствующую палетку графиков  $E_s = f(q_\Phi)$  для различных  $q_v = \text{const}$ . Используя, как и ранее, приведенные к температуре, для которой справедлива палетка,

значения  $E_s$  и  $Q_{\phi}$ , находим  $Q_B$ . Для этого наносим точку с координатами  $E_s$  и  $Q_{\phi}$  на семейство графиков, изображенных на рис. 80.

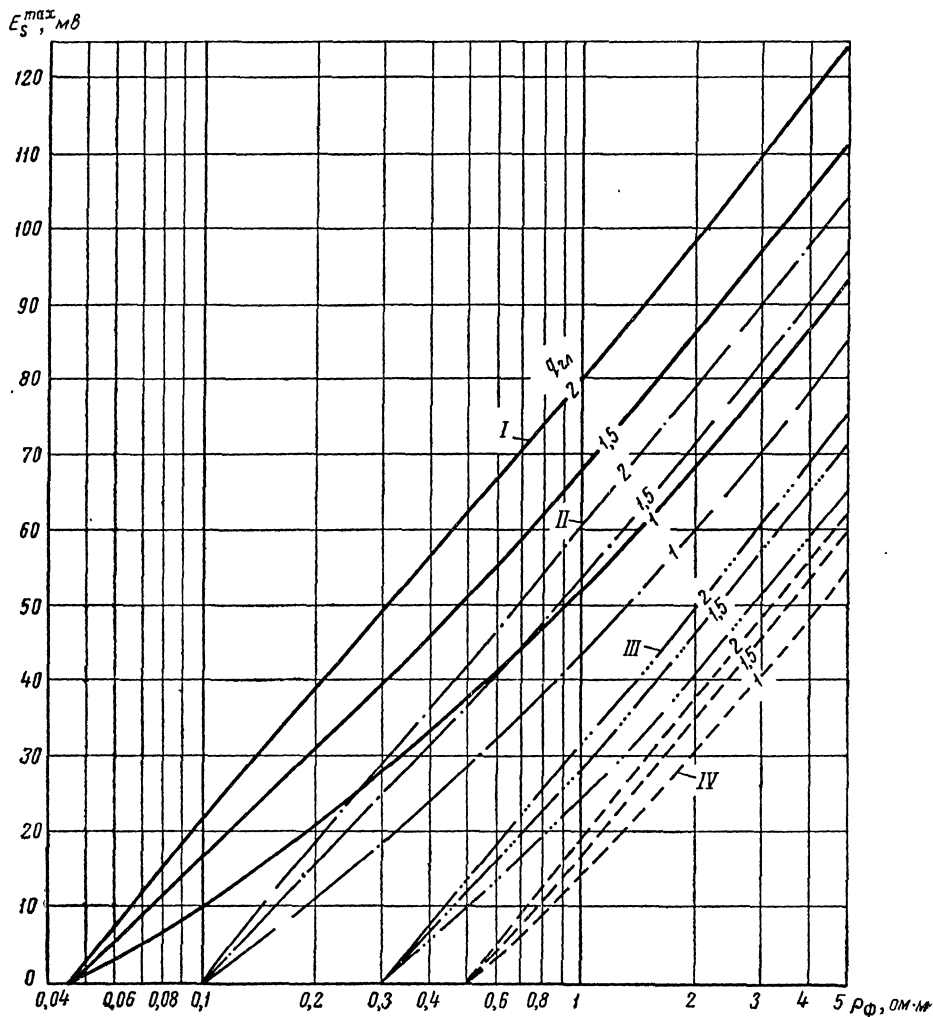


Рис. 80. Зависимости амплитуды  $E_s^{\max}$  в неглинистом пласте от  $Q_{\phi}$  для глин с различной характеристикой  $q$  при разных  $Q_B = \text{const}$ ,  $t = 25^\circ \text{C}$ .

Шифр кривых —  $q_{\text{гл}}$ . I —  $Q_B = 0,045 \text{ om} \cdot \text{m}$ ; II —  $Q_B = 0,1 \text{ om} \cdot \text{m}$ ; III —  $Q_B = 0,3 \text{ om} \cdot \text{m}$ ; IV —  $Q_B = 0,5 \text{ om} \cdot \text{m}$ .

Шифр графика, проходящего через точку, определяет искомую величину  $Q_B$ .

Пример. Определить величину  $C_B$ , если известно, что  $E_s$  в чистом коллекторе составляет 78 мВ при температуре  $50^\circ \text{C}$ ,  $Q_{\phi} =$

$= 1 \text{ ом} \cdot \text{м}$ . По упрощенному варианту получаем  $q_B = 0,1 \text{ ом} \cdot \text{м}$  при  $t = 50^\circ \text{C}$ . Исходя из предположения, что в пластовой воде присутствует только NaCl, находим  $C_B = 40 \text{ г/л}$ .

Пусть теперь известно, что  $q_{\text{гЛ}} = 2$ . Вычисляем для  $t = 25^\circ \text{C}$   $E_s = 71 \text{ мв}$ ,  $q_\Phi = 1,5 \text{ ом} \cdot \text{м}$ . По палетке (рис. 81) для заданных

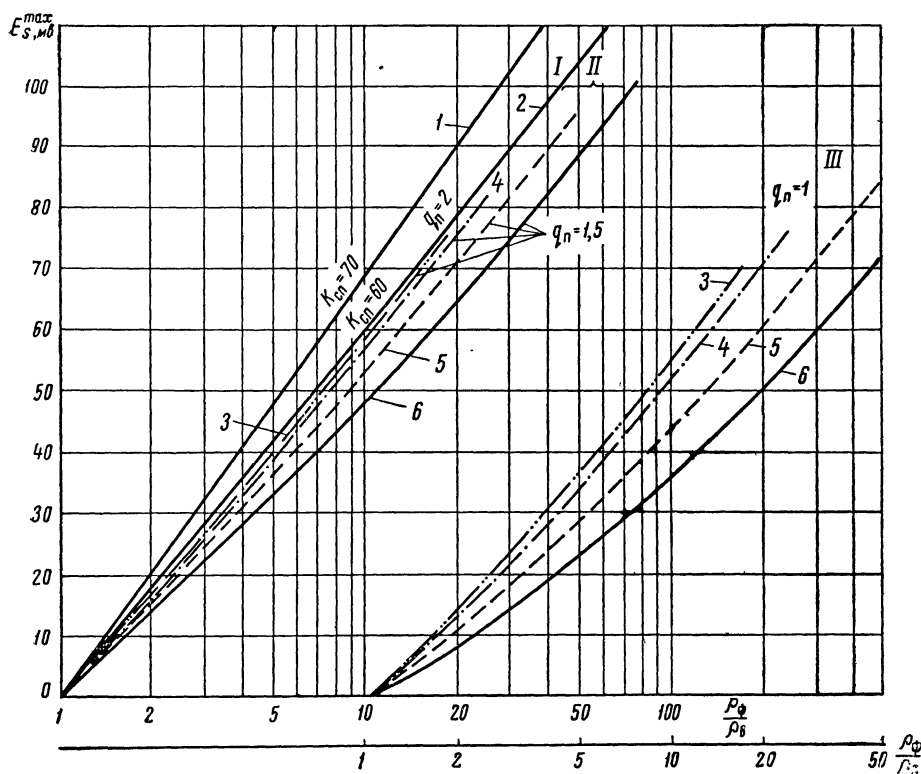


Рис. 81. Палетка для определения  $q_B$  и  $C_B$  по данным метода потенциалов собственной поляризации при различной характеристике  $q_{\text{гЛ}}$  глин.

I — идеально адсорбирующая порода; 2 — обобщенный график для разных  $q_B$ ,  $q = 2$ ; 3 —  $q_B = 0,5 \text{ ом} \cdot \text{м}$ ; 4 —  $q_B = 0,3 \text{ ом} \cdot \text{м}$ ; 5 —  $q_B = 0,1 \text{ ом} \cdot \text{м}$ ; 6 —  $q_B = 0,045 \text{ ом} \cdot \text{м}$ .

I —  $q_{\text{гЛ}} = 2$ ; II —  $q_{\text{гЛ}} = 1,5$ ; III —  $q_{\text{гЛ}} = 1$ .

$E_s$  и  $q_\Phi$  находим  $q_B = 0,1 \text{ ом} \cdot \text{м}$  при  $t = 25^\circ \text{C}$ , которому соответствует уточненное значение  $C_B = 68 \text{ г/л}$ .

Для пластовых вод с  $q_B \geq 0,1 \text{ ом} \cdot \text{м}$  (при  $t = 25^\circ \text{C}$ ), т. е. с  $C_B < 70 \text{ г/л}$  и при  $q_{\text{гЛ}} = 1,5$  при различных  $q_B = \text{const}$  графики являются почти прямыми в полулогарифмическом масштабе; в этом случае для ускорения определения  $q_B$  можно использовать упрощенный вариант, используя вместо  $K_{\text{СП } 18^\circ \text{C}} = 70 \text{ мв}$  уточненное значение  $K_{\text{СП}}$  для глины с данной характеристикой.

Учет нелинейности связи между амплитудой  $U_{\text{СП}}$  и величиной  $\lg q_{\text{ф}}$  производят иногда, вводя поправку в значение  $K_{\text{СП}}$ . Поправка задается, как функция отношения  $\frac{C_{\text{в}}}{C_{\text{ф}}}$ , полусуммы  $\frac{C_{\text{ф}} + C_{\text{в}}}{2}$  или среднего геометрического  $\sqrt{C_{\text{в}} C_{\text{ф}}}$  концентраций пластовых вод и фильтра бурового раствора. Для введения такой поправки надо знать величину  $C_{\text{в}}$ , которая неизвестна. Поэтому целесообразнее пользоваться способом, изложенным выше.

Основные источники погрешностей при определении  $C_{\text{в}}$  методом потенциалов собственной поляризации следующие.

1. Амплитуда аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}^{\text{max}}$  содержит компоненту фильтрационного происхождения.

Для глин средней степени уплотнения и глинистой корки из обычного глинистого раствора или из раствора, обработанного щелочным реагентом, величину  $\Delta U_{\text{СП ф}}$  можно оценить по графикам, приведенным на рис. 66, зная  $\Delta r$  и  $q_{\text{ф}}$ , а затем вычислить компоненту амплитуды аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  диффузионного происхождения

$$\Delta U_{\text{СП д}} = \Delta U_{\text{СП}} - \Delta U_{\text{СП ф}},$$

которая используется для определения  $q_{\text{в}}$ . Вычисление  $q_{\text{в}}$  без исключения фильтрационной компоненты амплитуды  $\Delta U_{\text{СП}}$  приведет к занижению  $q_{\text{в}}$  и завышению минерализации пластовых вод по сравнению с истинной.

2. Пласт, выбранный в качестве объекта для определения  $q_{\text{в}}$  по диаграмме  $U_{\text{СП}}$ , содержит глинистый материал, снижающий приведенную амплитуду аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  в пласте по сравнению со значением ее в неглинистом коллекторе для данных  $q_{\text{ф}}$ ,  $q_{\text{в}}$  и  $t$ . Расчет  $q_{\text{в}}$  по этому значению  $\Delta U_{\text{СП}}$  приведет к уменьшению минерализации пластовых вод по сравнению с фактической.

В тех редких случаях, когда увеличение отрицательной амплитуды  $\Delta U_{\text{СП}}$  за счет фильтрационных потенциалов и снижение ее вследствие влияния глинистого материала взаимно компенсируют друг друга, можно использовать  $E_{\text{s}}$  непосредственно для определения  $q_{\text{в}}$ .

3. Фильтрат бурового раствора и пластовые воды имеют сложный химический состав. В этом случае применение палеток, составленных на основе экспериментального изучения диффузионно-адсорбционных э. д. с. в растворах NaCl, дает искаженные значения  $q_{\text{в}}$  и  $C_{\text{в}}$ , поэтому рекомендуется использовать методику, предложенную в работе [21].

Вначале определяется величина  $q_{\text{в}}$  одним из способов, изложенных выше, в предположении, что пластовые воды и буровой раствор содержат NaCl. Эта величина рассматривается как некоторое условное, эквивалентное значение  $(q_{\text{в}})_{\text{э}}$ , по которому затем, зная температуру пласта и выбрав палетку, соответствующую данному



химическому составу растворов, определяют истинное значение  $q_v$  и соответствующее ему  $C_v$  (рис. 82).

Регистрация в скважине двух кривых  $U_{СП}$  при разной минерализации бурового раствора позволяет получить более надежные значения  $q_v$  и  $C_v$  по  $U_{СП}$  [29, 59].

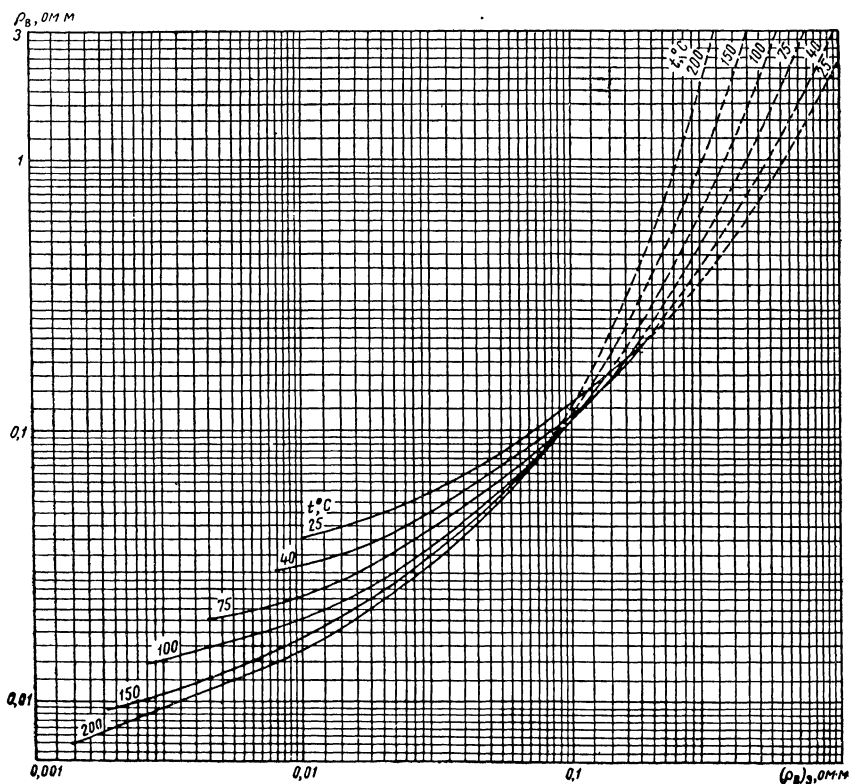


Рис. 82. Палетка для нахождения  $q_v$  и  $C_v$  по эквивалентному значению  $(q_v)_s$ , определяемому по диаграмме  $U_{СП}$  при сложном химическом составе растворов (по данным [21]).

Шифр кривых — температура  $t$ , °C.

Определение минерализации пластовых вод по диаграммам  $U_{СП}$  имеет особенно большое значение для разведки новых площадей при отсутствии надежных данных химического анализа пластовых вод. Знание  $q_v$  или  $C_v$  позволяет:

- а) обеспечить надежную оценку продуктивности коллекторов в разрезе скважины;
- б) выяснить закономерности изменения минерализации в пределах площади по отдельным горизонтам, что очень важно для

решения вопросов о перспективности коллекторов, формировании нефтегазоносной залежи и ее режиме;

в) изучить изменение минерализации вод по разрезу.

Значения минерализации пластовых вод, определенные по  $U_{\text{СП}}$  широко использованы А. М. Нечаем, А. М. Бедчером, К. А. Грудкиным при составлении карт минерализации по отдельным продуктивным горизонтам месторождений Грозненского Предкавказья, Западно-Кубанского прогиба и Бухаро-Хивинской нефтегазоносной провинции.

## § 25. РАЗДЕЛЕНИЕ ПОРОД НА КОЛЛЕКТОРЫ И НЕКОЛЛЕКТОРЫ И ОЦЕНКА ПОРИСТОСТИ И ПРОПИЦАЕМОСТИ ПОРОД В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОМ РАЗРЕЗЕ

Как было показано в главе I, в терригенных отложениях при наличии в коллекторах только глинистого цемента в качестве критерия для отнесения породы к коллектору или неколлектору можно использовать относительную глинистость  $\eta_{\text{гл}}$  или геофизический параметр, тесно связанный с  $\eta_{\text{гл}}$ , например,  $A_{\text{да}}$ . Учитывая, что значения  $A_{\text{да п}}$  песчаного пласта,  $A_{\text{да гл}}$  вмещающих пород и приведенная амплитуда  $E_s$  связаны определенным соотношением, в качестве критерия коллектора можно использовать абсолютное или относительное значение приведенной амплитуды аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$ .

Покажем возможность такого подхода на примере песчаников и алевролитов терригенной толщи девона Татарии и Башкирии. Ранее было установлено, что коллекторам этих отложений соответствуют значения  $\eta_{\text{гл}} < 0,4$ ; диапазон  $\eta_{\text{гл}} = 0,4-0,5$  можно рассматривать как область неоднозначности, представленную породами с плохими коллекторскими свойствами или с полным их отсутствием. Это позволяет наметить аналогичные три области пород: коллекторы, неколлекторы и породы с неопределенной характеристикой в системе графиков  $E_{\text{да}} = f(q_{\text{ф}})$ . Предполагая, что амплитуда  $\Delta U_{\text{СП}}$  имеет только диффузионное происхождение и, учитывая изложенное в главе II, кривые, приведенные на рис. 7, можно перестроить в графики  $E_s = f(q_{\text{ф}})$  для различных  $q_{\text{п}} = \text{const}$  при  $q_{\text{в}} = 0,045 \text{ ом} \cdot \text{м}$  (рис. 83). Эти графики позволяют определить приведенную амплитуду  $\Delta U_{\text{СП}}$  диффузионного происхождения для пластов с заданным параметром  $q_{\text{п}}$  при известном  $q_{\text{ф}}$ . Графики  $E_s = f(q_{\text{ф}})$   $q_{\text{п}} = 0,1$  и  $q_{\text{п}} = 0,3$  в этой системе кривых также являются границами соответствующих областей (рис. 83).

Используя данные из рис. 83 и вычисляя относительную амплитуду  $E'_s$  по формуле (158), можно получить зависимости  $E'_s = f(q_{\text{п}})$  для различных  $q_{\text{ф}} = \text{const}$ , которые показывают, что вид связи относительной амплитуды  $\Delta U'_{\text{СП}}$  с адсорбционной характеристикой пластов изменяется с изменением  $q_{\text{ф}}$  (рис. 84). Это обстоятельство только при сопоставлении  $E_s$  с пористостью отмечалось

В. М. Добрыниным и И. Ю. Лепешинским. Однако при изменении  $q_{\phi}$  в небольших пределах, например, от 0,5 до 1,5  $\text{ом} \cdot \text{м}$ , вид графика  $E'_s = f(q)$  меняется мало и для практических целей иногда можно пользоваться одним усредненным графиком, например, для  $q_{\phi} = 1 \text{ ом} \cdot \text{м}$ .

При необходимости связь между амплитудой  $\Delta U_{\text{сн}}$  и другими параметрами пласта, характеризующими его литологию (глинистость) или коллекторские свойства (пористость, проницаемость), можно выразить, используя зависимость  $E'_s = f(q)$ , а также корреляцион-

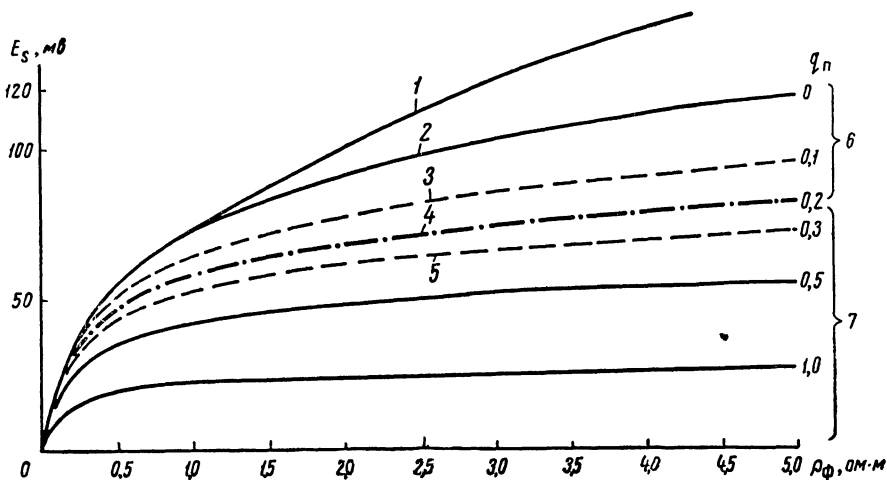


Рис. 83. Зависимости  $E'_s = f(q_{\phi})$  для пластов с различной глинистостью. Составлены по данным рис. 7. Вмещающие глины  $q_{\text{пл}} = 1,7$ . Шифр кривых —  $q_{\text{пл}} \cdot q_{\text{в}} = 0,045 \text{ ом} \cdot \text{м}$ ,  $t = 25^{\circ} \text{C}$ .

1 — график  $E'_s^{\text{max}} = f(q_{\phi})$ , построенный по результатам измерений в скважинах Ромашкинского и Шкаповского месторождений (по данным [33]); 2 — график  $E'_s^{\text{max}} = f(q_{\phi})$  по лабораторным данным [75]; 3, 5 — границы «области неоднозначности»; 4 — граница коллектор — неколлектор; 6 — коллекторы; 7 — неколлекторы.

ные связи между параметром  $q$  и интересующими нас параметрами  $C_{\text{гл}}$ ,  $\eta_{\text{гл}}$ ,  $k_{\text{ц}}$ ,  $k_{\text{цр}}$ , если эти связи достаточно тесные и надежно обоснованы керновым материалом.

Наиболее вероятные значения  $E'_s$  для трех категорий пород, рассмотренных выше: коллекторы —  $E'_s > 0,9$ ; породы с сомнительной характеристикой —  $0,9 > E'_s > 0,7$ ; неколлекторы  $E'_s < 0,7$  \*. Наиболее вероятно, что породы с  $E'_s > 0,8$  являются коллекторами.

\* Граничные значения  $E'_s$ , разделяющие три указанные зоны (коллекторы, породы с сомнительной характеристикой и неколлекторы), на наш взгляд, завышены. (Прим. ред.)

Напомним, что все изложенное справедливо для терригенных пород девона Татарии и Башкирии. По-видимому, сделанные выводы будут применимы также к другим терригенным породам, имеющим близкую к рассмотренным характеристику — преобладание глинистого цемента, параметр  $Q$  глинистого материала составляет  $5-10 \times 10^{-2} \frac{\text{Мг-сек}}{\text{г}}$ , граница коллектор — неколлектор соответствует

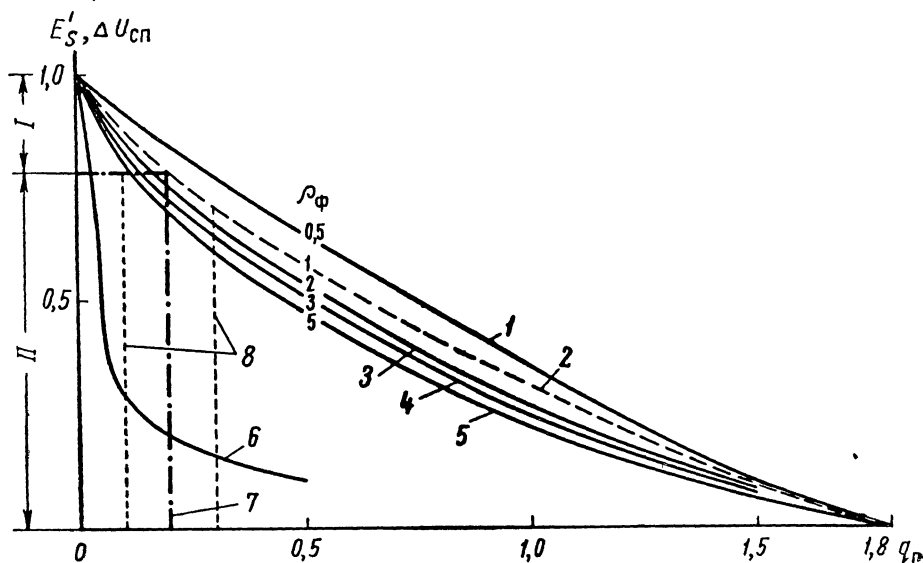


Рис. 84. Зависимость относительной амплитуды  $U'_{СП}$ ,  $E'_s$  от параметра  $q_{П}$  пласта.

$$q_{ГЛ} = 1,7, q_B = 0,045 \text{ ом} \cdot \text{м при } t = 25^\circ \text{ С.}$$

1-5 — зависимости  $E'_s = f(q_{Ф})$  для разных  $q_{Ф} = \text{const}$  (шифр кривых); 6 — зависимость  $\Delta U'_{СП} = f(q)$  для тех же условий при  $q_{Ф} = 1 \text{ ом} \cdot \text{м}$ , составленная с учетом связи между характеристикой пластов и их мощностью; 7 — граница коллектор — неколлектор; 8 — границы области неоднозначности. I — коллекторы, II — неколлекторы.

$\eta_{ГЛ} = 0,4-0,5$ . Такими породами являются, например, отложения угленосной свиты Волго-Уральской нефтеносной провинции, терригенные отложения нижнего мела месторождений Кубанской впадины.

Для отложений с отличной характеристикой возможно некоторое изменение конкретных значений  $q$  и  $E'_s$ , соответствующих границе между коллекторами и неколлекторами. Эти значения можно установить, выполнив анализ фактического материала в том плане, как это было рассмотрено выше. Для терригенных отложений со смешанным типом цемента, в частности, со значительной долей карбонатного цемента, для глинистых терригенных коллекторов с распределением глинистого материала в виде прослоев в толще коллектора применимость изложенного метода сомнительна.

Основной вывод из рассмотренного материала заключается в том, что отрицательная аномалия  $\Delta U_{\text{СП}}$  в терригенном разрезе даже при отсутствии карбонатного материала в породе еще не является признаком коллектора.

Для каждого конкретного разреза на основании анализа фактического материала необходимо установить область значений приведенной амплитуды  $\Delta U_{\text{СП}}$ , соответствующую породам-коллекторам.

При наличии достаточно тесной корреляционной связи между пористостью и глинистостью создаются предпосылки для оценки пористости терригенных пород по диаграммам  $U_{\text{СП}}$ , поскольку показания этого метода связаны с глинистостью через промежуточные параметры — приведенную емкость поглощения  $q_n$  и относительную глинистость  $\eta_{\text{гл}}$ .

### Оценка коэффициента пористости коллекторов

Идея о возможности определения пористости терригенных коллекторов по диаграммам  $U_{\text{СП}}$  принадлежит В. Н. Дахнову и В. Н. Кобрановой [32]. В последующем она была конкретизирована в работах ряда авторов, предложивших различные варианты способа определения пористости песчаников и алевролитов по диаграммам  $U_{\text{СП}}$  [18, 48, 61, 78]. Эти варианты основаны на фактическом материале терригенных отложений девона и угленосной свиты Татарии и Башкирии и применяются в различных районах Волго-Уральской нефтеносной провинции. Различия между ними заключаются в способе определения приведенной амплитуды аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$ , использовании относительной или абсолютной амплитуды аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  и в конкретном виде корреляционной связи между показаниями метода потенциалов собственной поляризации и пористостью.

Основой для определения пористости по диаграммам  $U_{\text{СП}}$  является корреляционная связь между амплитудой  $\Delta U_{\text{СП}}$  и открытой пористостью породы. Эта связь будет достаточно тесной при наличии следующих условий.

1. Для исследуемой совокупности пород изменение пористости связано в основном с увеличением глинистости.

2. Минеральный состав цемента достаточно однороден во всем диапазоне изменения глинистости.

В этом случае будет существовать достаточно тесная связь между параметрами  $A_{\text{да}}$ ,  $q_{\text{гл}}$  и  $\eta_{\text{гл}}$ , а следовательно, и между амплитудой аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  и коэффициентом пористости  $k_n$ .

Характер связи приведенной амплитуды аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  с величиной  $k_n$  можно установить:

- а) используя результаты определения параметров  $A_{\text{да}}$  и  $k_n$  на образцах;

- б) сопоставляя величину  $E_s$  или  $\Delta E'_s$ , определенную по диаграммам  $U_{\text{СП}}$ , со значением  $k_n$  по керну.

В первом случае на образцах необходимо определить  $A_{\text{да}}$  и  $k_{\text{п}}$ . Связь между  $E'_s$  и  $k_{\text{п}}$  по данным исследований образцов можно найти, воспользовавшись формулой

$$E'_s = 1 - \frac{A_{\text{да}}}{A_{\text{да}}^{\text{max}}}, \quad (160)$$

где  $A_{\text{да}}$  и  $A_{\text{да}}^{\text{max}}$  — коэффициенты диффузионно-адсорбционной активности данного образца и образца с максимальной диффузионно-адсорбционной активностью, соответствующего породам, отмечаемым на диаграмме  $U_{\text{СП}}$  максимальными отклонениями кривой вправо (линия глин). После этого параметры  $E'_s$  и  $k_{\text{п}}$  сопоставляются непосредственно для всех образцов.

Во втором случае выбирают пласты, хорошо охарактеризованные керном, для которых определяется значение  $E'_s$  и рассчитывается средняя пористость по керну.

Недостатком первого способа является отсутствие учета условий естественного залегания пород. Во втором способе основные трудности связаны с определением приведенной амплитуды аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$ ; кроме того, в начальной стадии разведочного бурения на площади далеко не всегда можно набрать достаточное количество пластов с представительным керном.

Основные особенности связи относительной приведенной амплитуды аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  с пористостью для песчаников и алевролитов Татарии вытекают из графика 5 (рис. 85). Для наиболее хороших коллекторов ( $k_{\text{п}} > 20\%$ ) величина  $E'_s = 1$  и по существу не меняется с изменением  $k_{\text{п}}$ . Пористость этих пород изменяется в основном за счет факторов, определяющих величину  $k_{\text{пск}}$ , т. е. степени отсортированности и окатанности скелетных зерен, а также компактности укладки зерен; глинистость их очень мала и практически не влияет на пористость [12, 46, 62].

В коллекторах с  $20\% > k_{\text{п}} > 15\%$  пористость изменяется в большей степени за счет глинистости, поэтому связь между  $E'_s$  и  $k_{\text{п}}$  в этой области значений  $k_{\text{п}}$  существует, хотя и является довольно пологой. Наконец, при  $k_{\text{п}} < 15\%$  в области плохих коллекторов и неколлекторов связь между параметрами  $E'_s$  и  $k_{\text{п}}$  выражена наиболее четко, но при неоднородном составе цемента именно в этой области наблюдается наибольшая дисперсия связи параметров  $E'_s$  и  $k_{\text{п}}$ .

Фактическая относительная амплитуда  $\Delta U'_{\text{СП}}$  связана с пористостью песчаников и алевролитов девона несколько иначе (рис. 86, а). Ее характеризует небольшое выполаживание в области  $k_{\text{п}} > 20\%$  и наиболее крутой участок для  $18\% > k_{\text{п}} > 12\%$ ; для неколлекторов ( $k_{\text{п}} < 12\%$ ) эта связь также выполаживается. Общий вид связи  $\Delta U'_{\text{СП}}$  и  $k_{\text{п}}$  сохраняется и для других отложений, например, для терригенных пород мезозоя Западной Сибири (рис. 86, б), нижне-

меловых отложений Кубанского прогиба (по данным В. К. Попова) и т. д. Изменяется лишь нижняя граница области  $k_{\Pi}$ , где  $E'_s$  не зависит от  $k_{\Pi}$ .

Таким образом, характер связи  $\Delta U'_{\text{СП}}$  и  $k_{\Pi}$  как будто создает более благоприятные условия для оценки пористости по величине фактической амплитуды, определяемой непосредственно по диаграмме

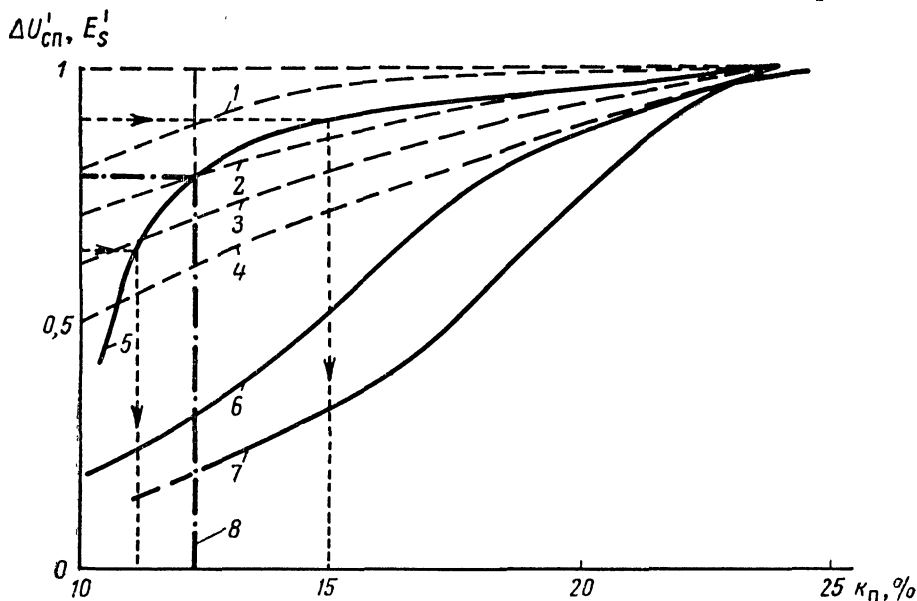


Рис. 85. Зависимости между относительной амплитудой аномалии  $\Delta U'_{\text{СП}}$  и пористостью для терригенных коллекторов девона Татарии и Башкирии.

1—4 — зависимости  $E'_s = f(k_{\Pi})$  по В. Н. Дахнову [32]; 5 — зависимость  $E'_s = f(k_{\Pi})$ , составленная по данным рис. 84 (кривая 2) с учетом связи между параметрами  $k_{\Pi}$  и  $q_{\Pi}$ ; 6 — корреляционная зависимость между  $\Delta U'_{\text{СП}}$  и  $k_{\Pi}$  (по рис. 86, а); 7 — зависимость  $\Delta U'_{\text{СП}} = f(k_{\Pi})$ , составленная по кривой 5 рис. 85; 8 — условная граница коллектор — неколлектор.

$U_{\text{СП}}$ . Такой вид связи характеризуется особенностями зависимостей между приведенной амплитудой  $\Delta U_{\text{СП}}$  и пористостью, с одной стороны, и коллекторскими свойствами, в частности пористостью и мощностью пластов, с другой.

Учитывая вид статистической связи между пористостью и мощностью песчаников угленосной толщи Арланского месторождения, полученной В. Л. Комаровым, можно искусственно построить зависимость параметра  $\Delta U_{\text{СП}}$  от пористости (рис. 85, кривая 6), во многом напоминающую фактическую зависимость, наблюдаемую между этими параметрами (рис. 85, 86). Границе коллектор — неколлектор соответствует на этой зависимости значение  $\Delta U'_{\text{СП}} = 0,2 \div 0,3$ ,

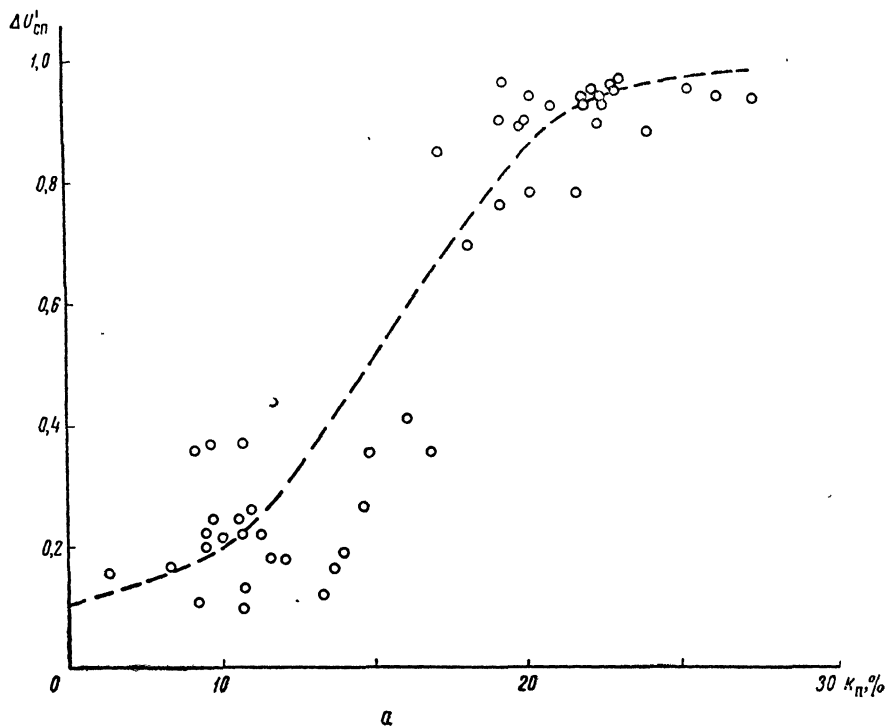
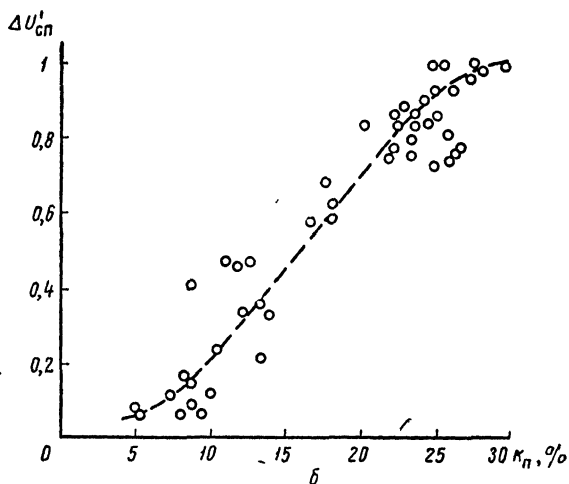


Рис. 86. Сопоставление параметров  $\Delta U'_{сп}$  и  $\kappa_n$  по пластам песчаников и алевролитов.

*a* — девонские отложения Туймазинского месторождения; *б* — терригенные отложения мезозоя (тарская и куломзинская свиты) Тарского Прииртышья (по данным [50]).





что не противоречит фактам, известным в практике интерпретации материалов по песчаникам и алевролитам, имеющим рассеянную глинистость.

Отдельные авторы [18] рекомендуют использовать для определения пористости фактическую амплитуду аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$ , однако, эта рекомендация неверна, поскольку такой способ может привести к грубым ошибкам при оценке пористости в отдельных пластах.

### Определение пористости по параметру $E'_s$

1. С помощью известных приемов устанавливают фактическую  $\Delta U_{\text{СП}}$  и приведенную  $E_s$  амплитуду аномалии потенциалов собственной поляризации в интерпретируемом пласте.

2. Находят приведенную амплитуду  $E_s^{\text{max}}$  в чистом неглинистом пласте. Сопоставляют значение  $E_s^{\text{max}}$ , приведенное к стандартной температуре, с ординатой графика  $E_s^{\text{max}} = f(\varphi_{\text{ф}})$  при заданном  $\varphi_{\text{ф}}$ . Если отличие велико, возможными причинами этого могут быть:

а) несоответствие масштаба записи, указанного на диаграмме, истинному;

б) значительная фильтрационная компонента.

Влияние первого фактора полностью исключается использованием относительной амплитуды. Во втором случае либо оценивают величину фильтрационной компоненты, как это показано выше, и вычитают ее из  $E_s^{\text{max}}$ , либо предполагают, что фильтрационная компонента в изучаемых отложениях возрастает с улучшением коллекторских свойств примерно по тому же закону, что и диффузионная. Если это так, использование относительной амплитуды также позволяет практически исключить влияние и этого фактора на результаты интерпретации [29, 51].

3. Вычисляют относительную амплитуду  $\mathfrak{M}$  по формуле (158).

4. По графику, выражающему корреляционную связь между  $E'_s$  и  $k_{\text{п}}$ , полученному одним из указанных выше способов, для заданного  $E'_s$  находят  $k_{\text{п}}$ . В области, где  $E_s$  практически не меняется с ростом  $k_{\text{п}}$ , указывают, что  $k_{\text{п}} \geq k_{\text{п}}^*$ , где  $k_{\text{п}}^*$  — нижний предел пористости, соответствующий границе этой области.

Погрешность оценки пористости по относительной амплитуде  $E_s$  зависит от дисперсии корреляционной связи между этими параметрами и крутизны графика, выражающего эту связь. В чистых коллекторах оценка пористости по СП, по-видимому, вообще нецелесообразна. В глинистых коллекторах со средними и плохими коллекторскими свойствами эту оценку можно выполнить с относительной погрешностью не менее  $\pm(10-20)\%$ .

Из опубликованных вариантов способа оценки пористости по относительной амплитуде  $E_s$  предпочтения заслуживает вариант В. Н. Дахнова [32, 33]. Особенностью этого варианта является предложение об использовании в качестве опорного пласта с известной

(по данным другого геофизического метода или керна) пористостью, причем этот пласт не обязательно должен характеризоваться максимальной амплитудой  $U_{\text{СП}}$ . Следовательно, если даже в разрезе отсутствует чистый коллектор с максимальной амплитудой  $U_{\text{СП}}$ , способ относительных амплитуд использовать можно при наличии пласта с известной пористостью.

**Примеры.** 1. Определить пористость песчаника по величине  $E'_s = 0,9$ , если известно, что корреляционная связь между параметрами  $E'_s$  и  $k_{\text{п}}$  выражается графиком 5 (рис. 69). Ответ:  $k_{\text{п}} = 15\%$ .

2. Определить пористость глинистого алевролита и установить, является ли он коллектором, если  $E'_s = 0,65$ , используя тот же график. Ответ:  $k_{\text{п}} = 11\%$ , неколлектор.

### Определение пористости по параметру $E_s$

В этом случае схема вычислений в основном та же. Различие заключается в том, что относительная амплитуда  $E'_s$  не вычисляется, но появляется новая операция: приведение абсолютной амплитуды  $E_s$  к стандартному сопротивлению  $q_p$  или  $q_{\text{ф}}$  [33] путем расчета по формуле

$$E_{s \text{ ст}} = E_s \beta, \quad (161)$$

где  $E_{s \text{ ст}}$  — приведенная к стандартному буровому раствору (с  $q_p = 1 \text{ ом} \cdot \text{м}$  или  $q_{\text{ф}} = 1 \text{ ом} \cdot \text{м}$ ) абсолютная амплитуда  $\Delta U_{\text{СП}}$ ;  $\beta$  — коэффициент, определяемый отношением

$$\beta = \frac{E_s^{\text{max}}}{E_{s \text{ ст}}^{\text{max}}}. \quad (162)$$

Здесь  $E_s^{\text{max}}$  и  $E_{s \text{ ст}}^{\text{max}}$  — амплитуды потенциалов собственной поляризации для чистых пород для заданного  $q_p$  и стандартного значения  $q_p$ .

Зависимость  $\beta = f(q_p, q_{\text{ф}})$  можно получить соответствующей обработкой графика  $E_s^{\text{max}} = f(q_{\text{ф}})$  (рис. 84) [14, 33]. Далее по графику корреляционной связи между параметрами  $E_{s \text{ ст}}$  и  $k_{\text{п}}$  для заданного  $E_{s \text{ ст}}$  находят  $k_{\text{п}}$ .

Следует отметить, что корреляционная связь между  $\Delta U_{\text{СП}}$  и пористостью при использовании как  $E'_s$ , так и  $E_s$  устанавливается отдельно для водоносных и нефтегазоносных коллекторов.

Поскольку на величину абсолютной амплитуды потенциалов собственной поляризации влияет ряд факторов, практически устраняемых при использовании относительной амплитуды  $E_s$ , определение пористости по  $E_s$  вообще нежелательно за исключением случая, когда в разрезе отсутствует надежный опорный пласт.

Из предложенных вариантов определения пористости по абсолютной амплитуде аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  предпочтения заслуживает способ Д. А. Шапиро — В. С. Неймана [78].

## Оценка коэффициента проницаемости коллекторов

Возможность оценки проницаемости терригенных коллекторов по диаграммам  $\Delta U_{\text{СП}}$  рассматривалась неоднократно рядом авторов [2, 6, 26, 29, 33, 41, 51]. В. Н. Дахнов и В. Н. Кобранова обосновывали эту возможность наличием корреляционной связи между параметрами  $A_{\text{да}}$  и  $k_{\text{пр}}$  (см. гл. I), которая отмечалась для песчаников и алевролитов продуктивных горизонтов месторождений Кубани и Волго-Уральской нефтеносной провинции, указывая, что наиболее тесная связь между показаниями  $\Delta U_{\text{СП}}$  и проницаемостью наблюдается в области низких значений  $k_{\text{пр}}$  [32, 33].

В. И. Азаматов и В. А. Бадьянов на примере песчано-глинистых коллекторов девона Ромашкинского месторождения показали существование довольно тесной корреляционной связи ( $r \approx 0,8$ ) между амплитудой аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  и проницаемостью  $k_{\text{пр}}$  в диапазоне изменения параметра  $k_{\text{пр}}$  от 100 до 600 мд [6].

Другие авторы полагают, что для оценки проницаемости терригенных коллекторов по диаграммам  $U_{\text{СП}}$  нет надежной физической основы [2, 62, 69].

Связь между параметром  $A_{\text{да}}$ , а, следовательно, и амплитудой аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  с проницаемостью действительно существует для тех терригенных пород, у которых отмечается хорошая корреляция между параметрами  $k_{\text{пр}}$  и  $\eta_{\text{гл}}$ , причем именно в том диапазоне  $k_{\text{пр}}$ , в пределах которого эта корреляция является достаточно тесной. Для песчаников и алевролитов девона Ромашкинского месторождения такая связь наблюдается при  $k_{\text{пр}} = 100-400$  мд (рис. 32), при  $k_{\text{пр}} > 400-500$  мд она совершенно отсутствует, а при  $k_{\text{пр}} < 100$  мд — слабая. Учитывая это, можно предположить, что именно в области  $k_{\text{пр}} = 100-400$  мд для данных отложений возможна связь между амплитудой аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  и проницаемостью. Для коллекторов с  $k_{\text{пр}} > 400-500$  мд использование данных метода потенциалов собственной поляризации при оценке проницаемости пород нецелесообразно, так как их проницаемость зависит главным образом от характеристики зерен скелетной фракции и мало связана с глинистостью.

Резюмируя изложенное, приходим к следующему выводу.

1. В терригенном разрезе при благоприятных условиях (отчетливо выраженная связь между пористостью и глинистостью, преобладание глинистого цемента, изменение минерализации пластовых вод в небольших пределах) по диаграммам  $U_{\text{СП}}$  можно выделить коллекторы и разделить их на две группы: чистые, слабо глинистые и глинистые.

2. При соблюдении тех же условий в глинистых коллекторах возможна оценка пористости по диаграммам  $U_{\text{СП}}$ , при этом наиболее точный способ решения этой задачи будет в случае использования относительной амплитуды аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$ .

## § 26. КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ МЕТОДОВ ПОТЕНЦИАЛОВ СОБСТВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ И СОПРОТИВЛЕНИЙ

Комплексная интерпретация диаграмм  $q_K$  и  $U_{СП}$  обеспечивает одну из главных частей информации, получаемой по данным промысловой геофизики при литологическом расчленении разреза, выделении и оценке коллекторов, определении их параметров. Остановимся на отдельных вопросах комплексного использования данных методов потенциалов собственной поляризации и сопротивлений.

### Оценка продуктивности коллектора в песчано-глинистом разрезе

Обычно в качестве основного критерия продуктивности песчано-глинистого коллектора используют критическое значение  $P_n^{кр}$  параметра насыщения. Оно соответствует максимальному водонасыщению, при котором данный коллектор еще способен отдавать при опробовании нефть наряду с водой [33, 69]. Значение  $P_n^{кр}$  устанавливается путем анализа результатов опробования совместно с данными бокового электрического зондирования или определяется из петрофизической характеристики коллектора.

При изменении глинистости коллекторов в широких пределах более эффективным способом оценки продуктивности является сопоставление приведенной амплитуды  $E_s$  с отношением удельных сопротивлений промытой зоны и неизменной части пласта  $q_{пп}/q_{пн}$ . Этот способ, разработанный американскими исследователями А. Пупоном, М. Лой, М. Тиксье, основан на существовании следующей эмпирической зависимости, предложенной Тиксье:

$$E_s = K_{СП} \lg \frac{q_{пп}}{q_{вп}}. \quad (163)$$

Здесь  $q_{вп}$  и  $q_{пп}$  — удельные сопротивления неизменной части и промытой зоны водоносного коллектора<sup>1</sup>. Выражение (163) справедливо как для чистых, так и для глинистых коллекторов; с уменьшением глинистости коллектора значение  $K_{СП}$  будет возрастать, достигая максимального значения в чистом коллекторе. Диапазон изменения  $K_{СП}$  для коллекторов изучаемого горизонта определяет область, соответствующую водоносным коллекторам, в системе координат  $E_s$ ,  $\lg q_{пп}/q_{пн}$ . Очевидно, что точки, находящиеся вне этой области, соответствуют продуктивным коллекторам благодаря изменению координаты  $\lg \frac{q_{пп}}{q_{пн}}$  по сравнению с типичным ее значением для того же коллектора, насыщенного пластовой водой (рис. 87).

<sup>1</sup> На практике нередко вместо  $q_{пп}$  используют величину удельного сопротивления зоны проникновения  $q_{зп}$ .

Границу областей продуктивных и водоносных коллекторов проводят на основании совместного анализа данных опробования и промысловой геофизики по ряду испытанных объектов, или исходя из теоретических соображений.

Установив положение границы вычисляют значения координат  $E_s$  и  $\frac{Q_{пп}}{Q_n}$  для каждого интерпретируемого пласта и точки с соответ-

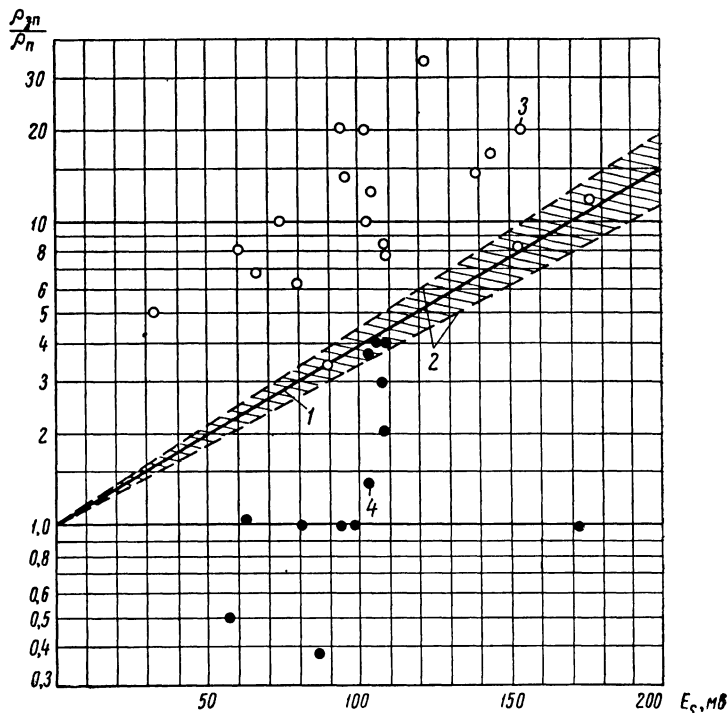


Рис. 87. Пример оценки продуктивности коллектора сопоставлением параметров  $Q_{пп}/Q_n$  и  $E_s$ , девонские отложения Шкаповского месторождения.

1 — граница областей, соответствующих водоносным и нефтеносным коллекторам; 2 — границы области неоднозначности; 3 — вода; 4 — нефть.

ствующими координатами наносят на бланк. Если точка располагается выше границы — пласт продуктивный, если ниже — водоносный.

Неопределенным является ответ, если точка попадает в область неоднозначности, границы которой зависят от погрешностей определения параметров  $E_s$ ,  $Q_{пп}$ ,  $Q_n$  (рис. 87).

Данный способ неприменим для продуктивных разрезов с коллекторами небольшой мощности, расположенными близко один

от другого, так как в этом случае определение значений  $Q_{\text{зп}}$  и  $Q_{\text{п}}$  сопряжено с большими трудностями или вообще невозможно.

**Пример.** Определить характер насыщения двух пластов песчаника, если известно, что для первого  $Q_{\text{пп}} = 20 \text{ ом} \cdot \text{м}$ ,  $Q_{\text{п}} = 50 \text{ ом} \cdot \text{м}$ ,  $E_s = 90 \text{ мв}$ , для второго  $Q_{\text{пп}} = 40 \text{ ом} \cdot \text{м}$ ,  $Q_{\text{п}} = 10 \text{ ом} \cdot \text{м}$ ,  $E_s = 60 \text{ мв}$ , используя график на рис. 87. Для первого пласта отношение  $Q_{\text{пп}}/Q_{\text{п}} = 0,4$ , для второго  $\frac{Q_{\text{пп}}}{Q_{\text{п}}} = 4$ . Нанося точки с координатами  $E_s$  и  $\frac{Q_{\text{пп}}}{Q_{\text{п}}}$  на график рис. 87, устанавливаем, что первый пласт является нефтеносным, второй — водоносным.

### Определение эффективной мощности тонкослоистой пачки в терригенном разрезе

Основы этой методики изложены в главе II. Определение эффективной мощности песчано-глинистой тонкослоистой пачки по указанной методике заключается в следующем.

1. Выделяют в разрезе пачку, которая является объектом интерпретации. Определяют общую мощность пачки  $H$  и среднее отклонение  $\Delta U_{\text{СП}}$  кривой  $U_{\text{СП}}$  от линии глин в пачке (рис. 88).

2. Вычисляют степень снижения  $\alpha$  амплитуды в глинистой пачке по сравнению с максимальным значением  $E_s^{\text{max}}$  для чистого коллектора по формуле

$$\alpha = \frac{\overline{E_s}}{E_s^{\text{max}}} . \quad (164)$$

Величину  $E_s^{\text{max}}$  определяют по диаграмме  $U_{\text{СП}}$  в чистом коллекторе (рис. 88); если такого пласта в разрезе нет, значение  $E_s^{\text{max}}$  рассчитывают с учетом характеристики вмещающих глин, температуры и значений  $Q_{\text{ф}}$ ,  $Q_{\text{в}}$ .

3. Вычисляют отношения  $Q_{\text{пп}}/Q_{\text{п}}$  и  $Q_{\text{пп}}/Q_{\text{гл}}$ , используя значения  $Q_{\text{пп}}$ ,  $Q_{\text{п}}$ ,  $Q_{\text{гл}}$ , определенные по данным метода сопротивления или рассчитанные по результатам лабораторного исследований образцов.

Напомним, что  $Q_{\text{пп}}$ ,  $Q_{\text{п}}$ ,  $Q_{\text{гл}}$  соответственно удельные сопротивления зоны проникновения, неизменной части чистых песчаных прослоев и прослоев глины в пачке. Принимается, что удельные сопротивления глин, вмещающих пачку, и прослоев глины в пачке одинаковы.

4. Выбирают палетку, шифр которой соответствует вычисленному  $Q_{\text{п}}/Q_{\text{гл}}$ , на палетке — кривую  $\alpha = f(\chi_{\text{гл}})$  с шифром, соответствующим заданному  $Q_{\text{п}}/Q_{\text{пп}}$ . По кривой для известного  $\alpha$  определяют относительное содержание по мощности глинистых прослоев в пачке  $\chi_{\text{гл}}$ .

Если вычисленные значения  $Q_{\text{п}}/Q_{\text{гл}}$  и  $Q_{\text{п}}/Q_{\text{пп}}$  не соответствуют шифрам имеющихся палеток и кривых, используя обычные приемы, проводят интерполяцию между значениями  $\alpha$ , определенными для палеток и кривых с ближайшими к заданным шифрами [16].

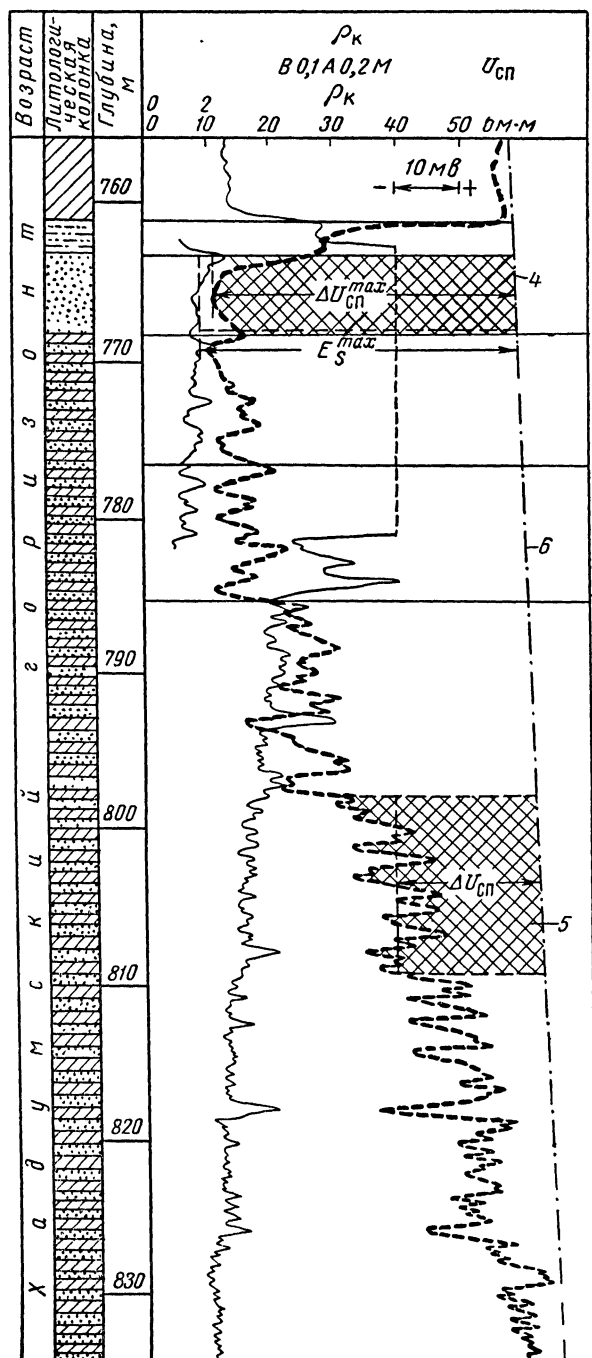


Рис. 88. Пример диаграммы  $U_{cp}$  в тонко-слоистом терригенном разрезе. Хадумский горизонт Североставропольского месторождения.

1 — чистый алеврит;  
2 — глина; 3 — чередование алеврита и глины;  
4 — опорный пласт;  
5 — интервал, использованный в примере на стр. 185; 6 — линия глин.

5. Полагая, что эффективная мощность пачки  $H_{эф}$  является суммой всех песчаных прослоев пачки, вычисляют ее по формуле

$$H_{эф} = H (1 - \chi_{гл}). \quad (165)$$

Данную методику целесообразно применять для оценки эффективной мощности тонкослоистых продуктивных коллекторов, продуктивность которых установлена по данным опробования или

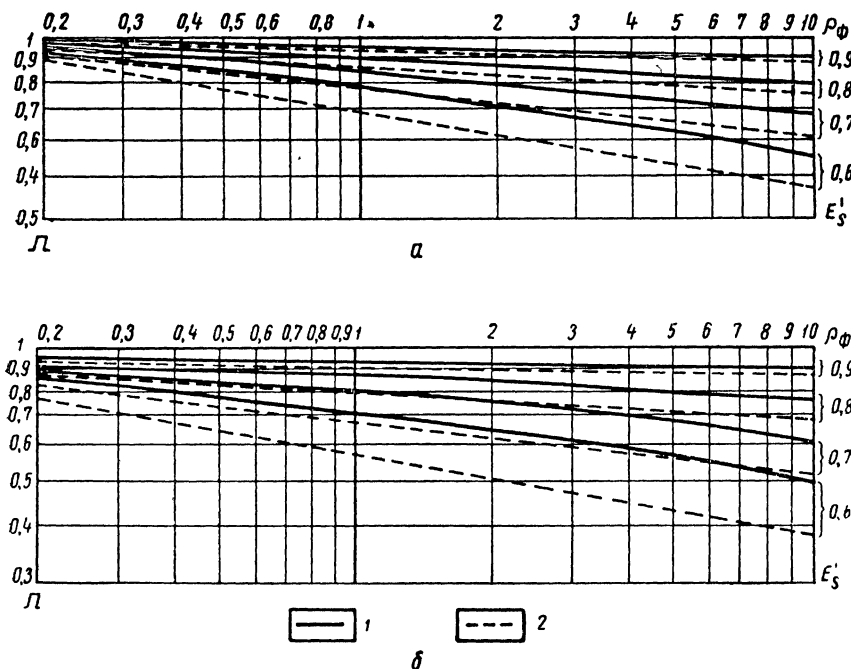


Рис. 89. Палетки для определения параметра  $\pi$  по величине  $E_c$  при заданном  $\rho_{\phi}$ .

Шифр кривых —  $E'_c$

а —  $q_B = 0,1$  ом·м, б —  $q_B = 0,045$  ом·м. ( $t = 25^\circ \text{C}$ ). 1 —  $q_{гд} = 1$ ; 2 —  $q_{гд} = 2$ .

метода сопротивлений. Наиболее благоприятными объектами для ее применения являются коллекторы типа песчано-алевритовых глинистых пород хадумского горизонта газовых месторождений Ставропольского Предкавказья [14], окобыкайской свиты нефтяных месторождений о-ва Сахалин и т. п.

Модель Г. Доля предусматривает наличие в пачке только прослоев чистого песка и чистой глины. Вероятность встретить в природе такую модель очень мала. По-видимому, в любой песчано-глинистой пачке присутствуют прослой коллектора с различной глинистостью и прослой глины с различным содержанием песчано-алевритового материала. Это существенно усложняет условия задачи



и позволяет рассматривать предложенную модель и разработанную на ее основе методику как пригодные лишь для приближенных оценок. Однако опыт определения эффективной мощности тонкослойистой пачки различными способами, в том числе и по данной методике, указывает на удовлетворительную сходимость результатов, полученных различными способами [14].

Кроме того, предложен также способ оценки эффективной мощности песчано-глинистой пачки по площади аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  [29].

**П р и м е р.** Определить эффективную мощность газонасыщенных прослоев алевроита в интервале 798—810 м (рис. 89), если известно, что в этом интервале  $\Delta \bar{U}_{\text{СП}} = 24$  мв,  $E_s = 50$  мв, определенное в верхней неглинистой части пачки, и по данным метода сопротивлений  $q_{\text{гл}} = 1$  ом·м,  $q_{\text{пп}} = 3$  ом·м,  $q_{\text{зп}} = 1,5$  ом·м.

Вычисляем  $\alpha = 0,47$ ;  $q_{\text{п}}/q_{\text{пп}} = 2$ ;  $\frac{q_{\text{п}}}{q_{\text{гл}}} = 3$ . Интерполяцией по соответствующим палеткам для вычисленного значения  $\alpha$  находим, что  $\chi_{\text{гл}} = 0,3$ . Зная, что  $H = 12$  м, вычисляем  $H_{\text{эф}} = 8,4$  м.

### Использование данных метода потенциалов собственной поляризации при определении пористости глинистых коллекторов по удельному сопротивлению

При определении пористости коллектора по удельному сопротивлению  $q_{\text{зп}}$  зоны проникновения вычисляют параметр пористости  $q_{\text{п}}$ , зная который по соответствующему графику  $q_{\text{п}} = f(k_{\text{п}})$  находят величину  $k_{\text{п}}$ . Корреляционная связь между параметрами  $P_{\text{п}}$  и  $k_{\text{п}}$  для исследуемых отложений характеризуется обычно эталонным графиком, полученным при насыщении образцов концентрированным раствором NaCl, а также семейством дополнительных зависимостей между  $P_{\text{п}}$  и  $k_{\text{п}}$ , соответствующих насыщению пород растворами NaCl различной минерализации. В главе I было показано, что при насыщении образцов пресным раствором дисперсия связи параметров  $P_{\text{п}}$  и  $k_{\text{п}}$  сильно возрастает, если в рассматриваемой совокупности имеются образцы с различной глинистостью, поэтому определение пористости по одному обобщенному графику  $P_{\text{п}} = f(k_{\text{п}})$  в этом случае нежелательно. Для повышения точности определения пористости по величине параметра  $P_{\text{п}}$  при насыщении породы пресным раствором можно использовать данные метода потенциалов собственной поляризации одним из следующих способов.

1. Про дифференцировать корреляционную связь между  $P_{\text{п}}$  и  $k_{\text{п}}$  по параметру, связанному с показаниями  $U_{\text{СП}}$  в скважине. В главе I была показана возможность такой дифференциации по параметру  $A_{\text{да}}$ . Для практических целей вместо  $A_{\text{да}}$  удобнее использовать относительную амплитуду аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$ , рассчитывая ее для соответствующих  $A_{\text{да}}$  и принятого значения  $A_{\text{да гл}}$  по формуле (160). Так, для примера, приведенного на рис. 42, границам между тремя группами образцов соответствуют расчетные значения  $E'_s$  0,35 и 0,2 вместо

$A_{\text{да}} = 36 \text{ мв}$  и  $A_{\text{да}} = 44 \text{ мв}$ . В дальнейшем, в зависимости от величины  $E'_s$  в интерпретируемом пласте для заданного  $q_{\text{ф}}$  выбирается соответствующая корреляционная зависимость  $P_{\text{п}}$  от  $k_{\text{п}}$ .

2. Использовать относительную амплитуду аномалии  $\Delta U_{\text{СП}}$  для определения параметра  $\Pi$ , после чего рассчитать приведенный параметр пористости  $P_{\text{п}}$ , соответствующий насыщению породы минерализованной водой, по формуле (107). Далее для вычисленного значения  $P_{\text{п}}$  по эталонному графику  $P_{\text{п}} = f(k_{\text{п}})$  находят пористость. Такой подход является более общим и поэтому предпочтительнее, чем первый. Применение его возможно при наличии специальных палеток, содержащих графики  $\Pi = f(q_{\text{ф}})$  для различных  $E'_s = \text{const}$  и фиксированного значения  $q_{\text{в}}$  (рис. 89). Способ построения таких палеток изложен в работе [15]. Для определения  $\Pi$  выбирают палетку с заданным шифром  $q_{\text{в}}$ ; на ней проводят вертикальную линию через точку на оси абсцисс с координатой  $q_{\text{ф}}$  до пересечения с графиком, шифр которого соответствует вычисленному значению  $E'_s$ . Ордината точки пересечения дает искомое значение  $\Pi$ . Величина  $\Pi$  будет тем больше отличаться от единицы, чем больше различие между значениями  $q_{\text{ф}}$  и  $q_{\text{в}}$ , а также чем больше относительная глинистость и параметр  $q_{\text{п}}$  породы.

Анализ палеток типа изображенной на рис. 89 показывает, что при  $q_{\text{ф}}/q_{\text{в}} \leq 50$  для коллекторов с  $E'_s \geq 0,8$  значение параметра  $\Pi$  изменяется от 0,75 до 1. В частности, при  $q_{\text{в}} = 0,045 \text{ ом} \cdot \text{м}$  и  $q_{\text{ф}} = 1 \text{ ом} \cdot \text{м}$  для терригенных коллекторов девона Татарии и Башкирии  $1 \geq \Pi \geq 0,8$ .

Палетки составлены для стандартной температуры  $25^\circ \text{C}$ , поэтому значения параметров  $q_{\text{ф}}$  и  $q_{\text{в}}$  следует привести к этой температуре, прежде чем пользоваться палеткой.

Оба способа учета влияния поверхностной проводимости на величину  $P_{\text{п}}$  с использованием относительной амплитуды  $E'_s$  в качестве корректирующего параметра применимы в одинаковой степени как для песчано-глинистых, так и для карбонатных коллекторов.

## § 27. КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДИАГРАММ ПОТЕНЦИАЛОВ СОБСТВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ И РАДИОМЕТРИИ

Если в области интерпретации диаграмм  $U_{\text{СП}}$ , а также диаграмм  $U_{\text{СП}}$  в комплексе с диаграммами сопротивлений произведенными и научными организациями накоплен большой опыт, то в области совместного использования данных методов потенциалов собственной поляризации и радиометрии такой опыт практически отсутствует. Рассмотрим, каковы перспективы комплексной интерпретации диаграмм  $U_{\text{СП}}$  и радиометрии, в первую очередь диаграмм  $I_{\text{нγ}}$  нейтронного гамма- и  $I_{\text{γ}}$  гамма-метода.

## Оценка пористости и глинистости по диаграммам $U_{\text{СП}}$ и $I_{\text{нУ}}$

Наличие тесной связи между относительной амплитудой  $E'_s$  и относительной глинистостью  $\eta_{\text{гл}}$  породы создает предпосылки для совместной интерпретации диаграмм  $U_{\text{СП}}$  и другого метода, показания которого определяются в основном пористостью, с целью одновременного определения открытой пористости  $k_{\text{п}}$  и глинистости ( $K_{\text{гл}}$  или  $C_{\text{гл}}$ ) породы. Таким методом может быть метод сопротивления, нейтронный гамма-метод или ультразвуковой. Известно, что на показания каждого из этих методов, наряду с пористостью, существенное влияние оказывает глинистость породы, поэтому совместная интерпретация диаграмм каждого из этих методов с диаграммами  $U_{\text{СП}}$  позволит, во-первых, учесть и исключить влияние глинистости при определении пористости, во-вторых, оценить содержание в породе глинистого материала.

Наиболее перспективным для одновременного определения параметров  $k_{\text{п}}$  и  $C_{\text{гл}}$  представляется совместное использование диаграмм  $I_{\text{нУ}}$  и  $U_{\text{СП}}$  в первую очередь в карбонатном и терригенном глинистом разрезах.

Известно, что показания  $I_{\text{нУ}}$  при отсутствии влияния хлора, бора и других элементов с аномальным сечением захвата определяются водородосодержанием породы  $\omega_{\text{Н}}$ . В породах, не содержащих глинистого материала и гипса, насыщенных пресной водой или нефтью, водородосодержание определяется только значением открытой пористости породы.

Водородосодержание  $\omega_{\text{Н}}$  глинистой породы зависит также от объемной глинистости  $K_{\text{гл}}$  и удельного объемного содержания  $\omega_{\text{Н кр}}$  кристаллизационной воды в данном типе глин:

$$\omega_{\text{Н}} = k_{\text{п}} + \omega_{\text{Н кр}} K_{\text{гл}}. \quad (166)$$

Определяя  $\omega_{\text{Н}}$  по диаграмме  $I_{\text{нУ}}$  с помощью известных зависимостей [16], величину  $\eta_{\text{гл}}$  по диаграмме  $U_{\text{СП}}$  при известном для исследуемого разреза среднем значении  $\omega_{\text{Н кр}}$  можно решить систему уравнений

$$\omega_{\text{Н}} = f(k_{\text{п}}, K_{\text{гл}}),$$

$$\eta = \varphi(k_{\text{п}}, K_{\text{гл}})$$

относительно неизвестных  $k_{\text{п}}$ ,  $K_{\text{гл}}$ . Процесс определения  $k_{\text{п}}$ ,  $K_{\text{гл}}$  можно упростить, составив палетку или номограмму для практически интересного диапазона параметров  $k_{\text{п}}$ ,  $\eta$  и  $\omega_{\text{Н кр}}$ . При составлении такой палетки исходят из конкретных зависимостей  $I_{\text{нУ}} = f(\omega_{\text{Н}})$  для различных  $K_{\text{гл}} = \text{const}$  при фиксированном  $\omega_{\text{Н кр}}$  (рис. 90а) и усредненной для данных отложений зависимости  $E'_s = f(\eta)$  (рис. 90б).

Остановимся на некоторых особенностях зависимостей  $I_{ny} = f(\omega_H)$  и  $E'_s = f(\eta)$  в карбонатном и терригенном разрезах. Для карбонатных отложений зависимость  $I_{ny} = f(\omega_H)$  надежно обоснована моделированием [16]. Не останавливаясь на влиянии факторов, связанных с условиями измерения (параметры скважины и прибора), отметим, что основной особенностью этой зависимости является выполаживание ее в области низких ( $\omega_H < 4\%$ ) и высоких ( $\omega_H > 25\%$ ) значений  $\omega_H$  (рис. 90а). В диапазоне  $\omega_H = 4-25\%$ ,

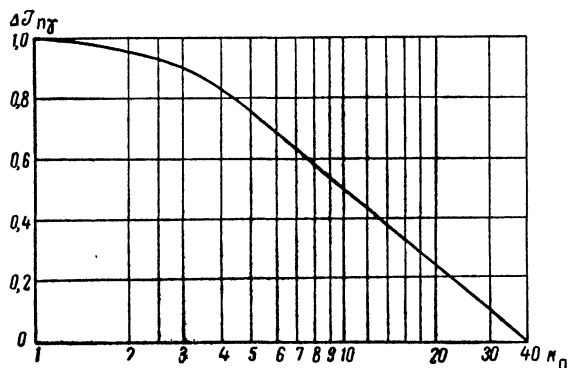


Рис. 90а. Обобщенная зависимость  $\Delta I_{ny} = f(k_n)$  для карбонатных пород (скважины необсаженные [16]).

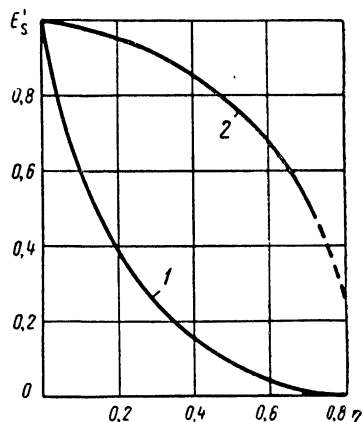


Рис. 90б. Типичные зависимости  $E'_s = f(\eta)$ .

1 — для карбонатных пород;  
2 — для терригенных пород.

охватывающем большую часть карбонатных коллекторов нефти и газа, зависимость показаний  $I_{ny}$  от водородосодержания является наиболее четкой. Особенностью связи между параметрами  $E_s$  и  $\eta_{гл}$  в карбонатном разрезе является быстрое снижение  $E'_s$  с ростом  $\eta_{гл}$  в области  $\eta_{гл} < 0,5$  и заметное выполаживание связи для высоких  $\eta_{гл}$  (рис. 90б).

Таким образом, наиболее подходящими объектами для совместной количественной интерпретации диаграмм  $I_{ny}$  и  $U_{сп}$  являются породы с пористостью 4—25% и относительной глинистостью менее 0,5.

Учитывая, что для глин, встречающихся в карбонатных отложениях, величина  $\omega_{Hкр}$  составляет 5—10% [16], поправка за влияние глинистости в значение пористости, найденное непосредственно по диаграмме  $I_{ny}$ , практически имеет смысл только для пород со значениями  $k_n > 3\%$  при  $\eta_{гл} > 0,5$ .

Для терригенных отложений основной особенностью зависимости  $I_{ny} = f(\omega_H)$  является выполаживание ее в области  $\omega_H > 20\%$ , соответствующей хорошим, обычно слабо глинистым коллекторам.

Зависимость  $E'_s = f(\eta)$  для песчано-глинистых пород в отличие от аналогичной зависимости в карбонатном разрезе характеризуется выполаживанием в области низких значений  $\eta$  и постепенным ростом крутизны с увеличением  $\eta$  (рис. 90б) <sup>1</sup>. В связи с этим совместная интерпретация диаграмм  $I_{\gamma}$  и  $U_{\text{СП}}$  песчано-глинистого разреза будет наиболее эффективной для глинистых пород со средними значениями пористости и глинистости.

### Определение глинистости по диаграммам $U_{\text{СП}}$ и $I_{\gamma}$

Содержание в породе глинистого материала является основным фактором, определяющим значения  $U_{\text{СП}}$  и  $I_{\gamma}$  по разрезу скважины. Однако глинистость разреза, как уже указывалось выше, по-разному влияет на показания этих методов; отклонение кривой  $U_{\text{СП}}$  от линии глин зависит в основном от относительной глинистости, тогда как естественная радиоактивность при отсутствии в разрезе радиоактивных минералов отражает объемную глинистость.

Определение глинистости по диаграммам  $I_{\gamma}$  сильно затруднено в коллекторе, содержащем большое количество полевого шпата, глауконита и битума. По-видимому, использование диаграмм  $I_{\gamma}$  для определения низких содержаний глинистого материала (до 2—3%), особенно в карбонатном разрезе, менее эффективно, чем диаграмм  $U_{\text{СП}}$ . В то же время на участках разреза, где показания  $U_{\text{СП}}$  практически не зависят от глинистости (высокие или постоянные значения  $\eta_{\text{гл}}$ ), можно рекомендовать определение последней по данным  $I_{\gamma}$  при отсутствии ограничений, оговоренных выше.

Если диаграмма  $U_{\text{СП}}$  не была зарегистрирована в данной скважине, данные гамма-метода являются единственным документом, дающим информацию о глинистости разреза.

Породы с промежуточной глинистостью как в терригенном, так и в карбонатном разрезе при отсутствии радиоактивных минералов являются благоприятными объектами для оценки глинистости по данным обоих методов. Заметим, что определение глинистости непосредственно по диаграмме  $U_{\text{СП}}$  без учета данных других методов нежелательно, так как корреляционная связь амплитуды  $U_{\text{СП}}$  с  $K_{\text{гл}}$  менее тесная, чем с  $\eta_{\text{гл}}$  (рис. 25), хотя качественно она характеризуется теми же особенностями. Целесообразнее определять глинистость по диаграммам  $U_{\text{СП}}$  при совместной интерпретации их с диаграммами  $I_{\gamma}$  или с диаграммами другого метода, отражающего пористость пород.

---

<sup>1</sup> Это положение автора является спорным и требует дальнейшего подтверждения лабораторными исследованиями. (Прим. ред.)

## О возможности совместной интерпретации диаграмм методов собственных потенциалов, сопротивлений, естественной радиоактивности и нейтронного гамма-метода

При наличии соответствующих условий метод собственных потенциалов позволяет оценивать относительную глинистость  $\eta = \frac{K_{г\lambda}}{k_{п} + K_{г\lambda}}$ ; метод сопротивлений — открытую пористость  $k_{п}$ , нейтронный гамма-метод — величину, близкую к абсолютной пористости  $k_{п\text{ абс}} = k_{п} + \omega_{н\text{ кр}} K_{г\lambda}$ ; гамма-метод — объемную глинистость  $K_{г\lambda}$ . Совместная интерпретация диаграмм этих методов позволит решать систему соответствующих уравнений с оценкой открытой пористости  $k_{п}$ , объемной глинистости  $K_{г\lambda}$  и объемного водородо-содержания в глинистом материале  $\omega_{н\text{ кр}}$ , а также эффективной пористости в коллекторах. В рассмотренном комплексе роль метода сопротивлений может играть и какой-либо другой метод, например, ультразвуковой или гамма-гамма-метод.

Разработка способов комплексной количественной интерпретации в указанном направлении, на наш взгляд, является одной из важнейших задач ближайшего будущего.

## § 28. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАГРАММ $U_{\text{СП}}$ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРОЦЕССОВ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ

Область применения диаграмм  $U_{\text{СП}}$  при изучении процессов осадконакопления определяется в основном их свойством характеризовать глинистость разреза. Это позволяет использовать диаграммы  $U_{\text{СП}}$  для изучения характера изменения литологии как по разрезу скважин, так и по площади исследуемого района, и условий седиментации слагающих его пород.

Рассмотрим отдельные примеры решения таких задач.

1. Анализ диаграммы  $U_{\text{СП}}$  по одной скважине дает возможность с учетом показаний других методов составить литологический разрез, выделить в нем участки с пониженной и высокой глинистостью.

Сопоставление диаграмм  $U_{\text{СП}}$  по ряду скважин площади или района для определенных горизонтов позволяет построить карты, характеризующие изменение песчанистости, глинистости, коллекторских свойств этих горизонтов, карты фаций и т. п.

На основании подобных карт можно восстановить палеогеографическую обстановку на данной площади в рассматриваемый отрезок времени, указать наиболее перспективное направление дальнейшей разведки месторождения, обосновать материалы для подсчета запасов нефти и газа. Диаграммы  $U_{\text{СП}}$  в сочетании с данными гамма-метода позволяют также выделить в разрезах скважин породы, которые можно рассматривать как покрывки для нефтегазоносных

коллекторов, и установить, насколько они надежны и выдержаны по площади.

Карты песчанистости, карты фаций и т. п., составленные в основном по данным  $U_{\text{СП}}$ , были получены и успешно использованы для решения указанных задач многими исследователями в различных геологических провинциях, особенно на Северном Кавказе: А. А. Сафонцевым, Г. Т. Юдиным (в Ставрополье, Затеречной равнине), М. Р. Пустильниковым, А. М. Бедчером, В. К. Поповым (на Кубани) и др.

2. Корреляция диаграмм  $U_{\text{СП}}$  в пределах отдельных площадей и месторождений, а также крупных геологических провинций для значительных участков разреза позволяет выделить в разрезе и проследить иногда на большом расстоянии надежные геоэлектрические реперы, провести стратиграфическое расчленение разрезов, выявить границы трансгрессивного несогласия между отдельными комплексами отложений, установить выпадение отдельных участков разреза и т. п.

На рис. 91 показан пример корреляции разрезов скважин в терригенных отложениях нижнего мела месторождения Озек-Суат. Диаграммы сопротивлений слабо дифференцированы и не содержат надежных коррелятивов, тогда как диаграммы  $U_{\text{СП}}$  выделяют в разрезе надежные реперы, прекрасно прослеживаемые по площади. Тщательный анализ диаграмм  $U_{\text{СП}}$  в этом разрезе позволил А. А. Сафонцеву выделить отдельные циклы седиментации — регрессивные (пачка IV) и трансгрессивные (пачки I—III), установить выпадение отдельных участков разреза за счет трансгрессивного залегания вышележащих отложений (верхняя часть пачки I) [68].

С. С. Итенбергом проведены обширные исследования по унификации геоэлектрических разрезов площадей разведочного бурения Восточного и Центрального Предкавказья, в которых большое значение придается выводам, полученным на основании анализа и корреляции диаграмм  $U_{\text{СП}}$ <sup>1</sup>.

Имеются примеры геоэлектрических реперов, отмечаемых на диаграммах  $U_{\text{СП}}$ , прослеживаемых на сотни километров в пределах крупных геологических регионов. Пример такого репера — контакт зеленых и малиновых глин в разрезе Ферганского нефтеносного района — описан в работе В. Н. Дахнова [26].

Другим подобным примером является пачка мергелей в отложениях кумского горизонта третичной системы, которая отмечается характерной аномалией  $U_{\text{СП}}$  и прослеживается в пределах огромной территории, охватывающей Центральное Предкавказье, Кубанский пригиб и Степной Крым.

---

<sup>1</sup> См. работу: И. И. Итенберг «Унификация стратиграфических границ эоценовых отложений Центрального и Восточного Предкавказья по геолого-геофизическим данным». Прикладная геофизика, вып. 26. Гостоптехиздат, 1960.

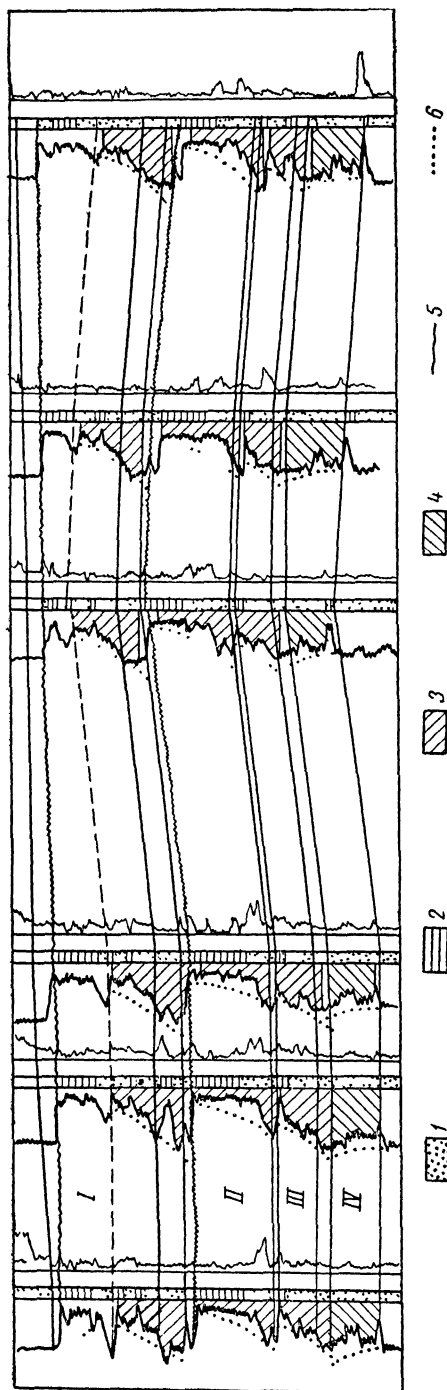


Рис. 91. Пример корреляции разрезов скважин и выделения циклов седиментации по диаграммам  $U_{сп}$ . Отложение нижнего мела месторождения Озек-Суат (по А. А. Сафонцеву).

1 — песчаники; 2 — глины; 3 — трансгрессивные циклы; 4 — регрессивные циклы; 5 — границы несогласий; 6 — график тенденции изменения потенциала  $U_{сп}$  в цикле.



Все рассмотренные примеры относятся к терригенным разрезам. Однако имеются примеры успешного использования диаграмм  $U_{\text{СП}}$  в комплексе с диаграммами других методов для корреляции карбонатных и карбонатно-терригенных разрезов в пределах крупных геологических районов. Убедительные примеры такой корреляции, позволившей сделать принципиально новые выводы о возрасте отдельных отложений, содержатся в работах В. А. Долицкого, М. М. Грачевского и др.

Можно без преувеличения утверждать, что в отдельных случаях диаграммы метода потенциалов собственной поляризации дают наиболее полную информацию с точки зрения возможностей использования их для региональной корреляции, причем до настоящего времени эти возможности использованы далеко не полностью. В этом отношении с методом потенциалов собственной поляризации может конкурировать только гамма-метод, отражающий, как и метод потенциалов собственной поляризации, в первую очередь глинистость и, следовательно, литологию разреза.

### Заключение

Учитывая изложенное в данной главе, а также содержание предыдущих глав, оценим современное состояние метода потенциалов собственной поляризации и возможности его дальнейшего развития и использования.

Основным преимуществом метода является простота схемы измерений. Недостатком метода, серьезно осложняющим возможность его использования в ряде случаев, является чувствительность показаний метода к ряду факторов, не относящихся к характеристике разреза скважины: составу бурового раствора, состоянию стенок скважины, времени между моментами вскрытия и изучения пласта, теллурическим и промышленным токам.

В основе качественной и количественной интерпретации диаграмм метода потенциалов собственной поляризации лежит предположение о том, что основное значение в формировании естественных электрических полей в скважинах нефтяных и газовых месторождений имеет э. д. с. диффузионного происхождения. Это предположение справедливо за исключением отдельных частных случаев, когда значительная роль принадлежит также э. д. с. фильтрационным и окислительно-восстановительным. Исходя из этого, диаграммы  $U_{\text{СП}}$  рассматривают прежде всего как характеристику глинистости разреза и, следовательно, его литологии.

В результате индивидуальной интерпретации диаграмм  $U_{\text{СП}}$  с учетом данных других методов промысловой геофизики решают следующие задачи.

1. Производят литологическое расчленение разрезов скважин, выделяют в них слабо глинистые и неглинистые породы, глины и сильно заглинизированные отложения, которые при известных

условиях могут являться надежными литологическими покрывками для залежей газа и нефти.

2. Для терригенного разреза — осуществляют оценку минерализации пластовых вод в чистых неглинистых песчаниках и алевролитах, разделяют выделенные пласты песчаников и алевролитов на неколлекторы и коллекторы, а последние — на глинистые и неглинистые коллекторы. В глинистых коллекторах с глиной, распределенной по объему коллектора, возможна оценка пористости и проницаемости по диаграммам  $U_{\text{СП}}$  при постоянстве минерализации пластовых вод и минерального состава цемента. Для тонкослоистого глинистого коллектора возможно определение эффективной мощности песчано-алевритовых прослоев.

3. Для карбонатного разреза — производят оценку минерализации пластовых вод в чистых неглинистых пластах, оценивают с учетом показаний  $I_{\text{н}}$  относительную и объемную глинистость пород.

4. В отложениях с терригенным, карбонатным и смешанным разрезом выделяют геоэлектрические реперы, используя их для корреляции как на отдельных месторождениях и разведочных площадях, так и в пределах крупных геологических регионов, установления границ несогласного залегания, фациального изменения отдельных горизонтов по площади и т. д.

Несмотря на то, что метод потенциалов собственной поляризации является одним из ведущих в современном комплексе промышленной геофизики, эффективность использования диаграмм  $U_{\text{СП}}$  еще не отвечает потенциальным возможностям метода, что объясняется прежде всего незавершенностью разработки способов интерпретации диаграмм  $U_{\text{СП}}$ , а в ряде случаев низким качеством первичного материала или отсутствием учета условий, в которых он был получен.

Для повышения геологической эффективности использования данных метода потенциалов собственной поляризации в дальнейшем целесообразно рекомендовать следующее.

#### *В области изучения физических основ метода*

1. Разработать более строгую теорию, связывающую диффузионно-адсорбционные, фильтрационные потенциалы, вызванную электрохимическую активность, поверхностную проводимость с характеристикой адсорбционных свойств и структурных особенностей пористой капиллярной системы.

2. Изучить множественные корреляционные связи диффузионно-адсорбционной активности с гамма-активностью и параметрами, характеризующими коллекторские свойства и глинистость терригенных пород<sup>1</sup>.

3. Исследовать природу диффузионно-адсорбционной активности карбонатных пород.

---

<sup>1</sup> Первыми попытками в этом направлении являются работы И. Ю. Лепешинского [51] и М. М. Элланского.

4. Составить более удобные для практического использования палетки, связывающие диффузионно-адсорбционные э. д. с., концентрации или удельные сопротивления растворов и адсорбционные свойства породы для различных типичных растворов со сложным химическим составом.

5. Продолжить изучение значения минерального состава цемента в определении диффузионно-адсорбционных свойств терригенных пород.

6. Дать наиболее обоснованную методику определения положения нулевой линии на диаграмме  $U_{\text{СП}}$ .

*В области техники регистрации диаграмм  
и учета условий измерения*

1. Произвести более тщательное опробование метода селективных потенциалов в высокоомных разрезах карбонатных и метаморфизованных терригенных пород.

2. В условиях, когда невозможно обеспечить стабильность потенциала обычных электродов из свинца, применять специальные неполяризующиеся электроды.

3. Обеспечивать строгое соответствие фактического масштаба напряжений кривой  $U_{\text{СП}}$  указываемому на диаграмме.

4. Получать на буровой все сведения о процессе бурения, необходимые для обоснованной интерпретации диаграмм  $U_{\text{СП}}$ : полная характеристика бурового раствора при проходке различных участков разреза и перед началом измерений, время вскрытия отдельных интервалов разреза и точная дата замера.

5. При регистрации диаграмм  $U_{\text{СП}}$  соблюдать все требования, изложенные в соответствующей Инструкции Геологического комитета СССР по проведению промыслово-геофизических работ в скважинах.

*В области геологической интерпретации диаграмм  
потенциалов собственной поляризации*

1. Разработать критерий коллектора по диаграммам  $U_{\text{СП}}$  в терригенных породах с преобладанием глинистого цемента, распределенного по объему породы, для отложений различного возраста основных нефтегазоносных провинций СССР.

2. Путем анализа обширного фактического материала с применением электронно-вычислительных машин выяснить возможность использования диаграмм  $U_{\text{СП}}$  в комплексе с данными других методов для оценки открытой и эффективной пористости, проницаемости и глинистости определенных типов терригенных коллекторов.

3. Увеличить степень использования диаграмм  $U_{\text{СП}}$  при комплексной интерпретации данных промысловой геофизики карбонатного и карбонатно-терригенного разрезов, в первую очередь, при решении вопросов, связанных с выделением в разрезе коллекторов, покрышек и зон возможного развития карстовых процессов.

---

## ЛИТЕРАТУРА

1. Агапов Ю. И. Потенциалы фильтрации. Прикладная геофизика, вып. 8. Гостоптехиздат, 1952.
2. Акишев П. М., Вахитов Т. Т., Свихнушин Н. М., Султанов С. А. Об оценке пористости и проницаемости пород по данным потенциалов собственной поляризации. Татарская нефть, № 11, 1962.
3. Альпин Л. М., Шейнман С. М. Некоторые расчеты по спонтанной поляризации. Бюлл. нефт. геофиз., вып. III, ОНТИ, 1936.
4. Анпилогов А. П. Выделение заводских пластов и прослоев по данным промыслово-геофизических исследований. Прикладная геофизика, вып. 32. Гостоптехиздат, 1962.
5. Анпилогов А. П., Галевич А. Ш., Масюкова Л. Т. О влиянии различных факторов на диаграммы ПС. Разведочная и промысловая геофизика, вып. 43. Гостоптехиздат, 1962.
6. Бадьянов В. А., Азаматов В. И. Исследование возможности определения пористости и проницаемости по ПС. Татарская нефть, № 10, 1960.
7. Балева З. Опыт применения электрохимического каротажа нефтяных скважин в Польше. Геология нефти и газа, № 3, 1964.
8. Берлин Т. С. Определение емкости поглощения глин с помощью органических красителей. Исследование и использование глин. Изд-во Львовского университета, 1958.
9. Бурсиан В. Р. К вопросу о распределении потенциала вдоль оси скважины при наличии диффузионных (контактных) э. д. с. Бюлл. нефт. геофиз., вып. III. ОНТИ, 1936.
10. Вендельштейн Б. Ю. Расчет кривых спонтанной поляризации. Сборник научных работ студентов горнометаллургических институтов Москвы. Москва, 1949.
11. Вендельштейн Б. Ю. О связи между параметрами двойного электрического слоя на поверхности частиц и диффузионно-адсорбционной э. д. с. Труды МНИ, вып. 22. Гостоптехиздат, 1958.
12. Вендельштейн Б. Ю. О природе диффузионно-адсорбционных потенциалов. Прикладная геофизика, вып. 26. Гостоптехиздат, 1960.
13. Вендельштейн Б. Ю. О связи между параметром пористости, коэффициентом поверхностной проводимости, диффузионно-адсорбционной активностью и адсорбционными свойствами терригенных пород. Труды МИНХ и ГП, вып. 31. Гостоптехиздат, 1960.

14. Вендельштейн Б. Ю., Танасевич Н. И. Определение эффективной мощности газоносных коллекторов хадумского горизонта Северо-Ставропольского месторождения. Сб. «Применение методов промысловой геофизики при изучении газоносных коллекторов». Гостоптехиздат, 1962.

15. Вендельштейн Б. Ю. Об учете глинистости при определении пористости по данным метода сопротивлений. Прикладная геофизика, вып. 32. Гостоптехиздат, 1962.

16. Вендельштейн Б. Ю., Ларионов В. В. Использование данных промысловой геофизики при подсчете запасов нефти и газа. Изд-во «Недра», 1964.

17. Вендельштейн Б. Ю., Элланский М. М. О влиянии адсорбционных свойств пород на зависимость относительного сопротивления от пористости. Прикладная геофизика, вып. 40. Изд-во «Недра», 1964.

18. Вилков Н. В. Опыт определения пористости пластов по параметру ПС. Геология нефти, № 12, 1958.

19. Гапон Е. Н. Электрохимический метод определения поверхности адсорбентов и коллоидов. Коллоидный журнал, № 1, 1947.

20. Гельферих Ф. Иониты. ИЛ, 1962.

21. Гондуэн М., Тиксье М., Симард Ж. Влияние химического состава электролитов на диффузионно-адсорбционную э. д. с. Сб. «Промысловая геофизика», вып. 1. Гостоптехиздат, 1959.

22. Горбунов Н. И. Поглотительная способность почв и ее природа. Сельхозгиз, 1948.

23. Гортиков В. М., Остапенко И. Г. Знак заряда карбоната кальция в связи с его образованием и составом равновесного раствора. Коллоидный журнал, № 5, 1935.

24. Гортиков В. М., Малиновская Н. П. Электрокинетический потенциал природных карбонатов кальция. Коллоидный журнал, № 5, 1936.

25. Грим Р. Мипералогия глин. ИЛ, 1956.

26. Дахнов В. Н. Каротаж скважин. Интерпретация каротажных диаграмм. Гостоптехиздат, 1941.

27. Дахнов В. Н. Интерпретация каротажных диаграмм. Гостоптехиздат, 1948.

28. Дахнов В. Н. Промысловая геофизика. Гостоптехиздат, 1959.

29. Дахнов В. Н. Интерпретация результатов геофизических исследований скважин. Гостоптехиздат, 1962.

30. Дахнов В. Н. и Кобранова В. Н. О связи диффузионно-адсорбционной активности с литологией пород. Труды МНИ, вып. 15. Гостоптехиздат, 1955.

31. Дахнов В. Н., Кобранова В. Н. Новые данные о природе естественных электрических полей в скважинах. Труды МНИ, вып. 5. Гостоптехиздат, 1947.

32. Дахнов В. Н., Кобранова В. Н. Изучение коллекторских свойств и нефтенасыщенности продуктивных горизонтов нефтяных месторождений по данным промысловой геофизики. Сб. «Промысловая геофизика». Гостоптехиздат, 1952.

33. Дахнов В. Н., Долина Л. П. Геофизические методы изучения нефтегазоносных коллекторов. Гостоптехиздат, 1959.

34. Дворкин Л. Б. Время становления мембранных э. д. с. Журнал физической химии, № 3, 1964.

35. Долицкий В. А. Изучение истории осадконакопления по материалам геофизических исследований скважин. Прикладная геофизика, вып. 29. Гостоптехиздат, 1961.

36. Доль Г. Г. Потенциалы СП в глинистых песках. Сб. «Вопросы промысловой геофизики». Гостоптехиздат, 1957.

37. Доль Г. Г. Метод селективированных СП. Сб. «Вопросы промысловой геофизики». Гостоптехиздат, 1957.

38. Дорошенко В. Н., Столовицкий В. М. Автоматическая регистрация диффузионно-адсорбционных потенциалов. Труды КФ ВНИИ, вып. 13. Изд-во «Недра», 1964.

39. Изгарышев Н. А., Горбачев С. В. Курс теоретической электрохимии. Госхимиздат, 1951.

40. Кобранова В. Н. К вопросу оценки эффективной пористости горных пород. Труды МИНХ и ГП, вып. 15. Гостоптехиздат, 1955.

41. Кобранова В. Н. Физические свойства горных пород. Гостоптехиздат, 1963.

42. Кобранова В. Н. Влияние химико-минерального состава пород на их диффузионно-адсорбционную активность. Геология нефти, № 6, 1957.

43. Кобранова В. Н., Лепарская Н. Д. Определение физических свойств горных пород. Гостоптехиздат, 1957.

44. Козина З. К., Шмарова В. П. Зависимость амплитуды отклонения кривой ПС от удельных сопротивлений пластовой воды и фильтрата бурового раствора. Прикладная геофизика, вып. 20. Гостоптехиздат, 1958.

45. Комаров В. Л. Статистическая оценка коллекторских параметров песчаных пластов. Труды УфНИИ, вып. 8. Гостоптехиздат, 1962.

46. Комаров С. Г., Кейвсар З. И., Козина З. К., Скобликова Г. И., Гузанова И. Г. Определение пористости по ПС. Прикладная геофизика, вып. 25. Гостоптехиздат, 1960.

47. Копосов И. А. Результаты исследования электрического сопротивления и потенциалов собственной поляризации карбонатных пород карстового комплекса Караби-Яйлы. Труды МИНХ и ГП, вып. 41. Гостоптехиздат, 1962.

48. Кринари А. И. Опыт определения открытой пористости по кривой ПС в условиях терригенной толщи девона юго-восточной Татарии. Нефтяное хозяйство, № 12, 1954.

49. Кудрявцев В. С. О диффузионно-адсорбционной активности карбонатных пород верхнего мела (Крым). Нефть и газ, № 3, 1965.

50. Леонтьев Е. И. О возможности определения пористости горных пород по данным метода потенциалов собственной поляризации. Труды МИНХ и ГП, вып. 41. Гостоптехиздат, 1962.

51. Лепешинский И. Ю. Исследование связей между удельным сопротивлением, естественными потенциалами и коллекторскими свойствами песчано-алевритовых пород. Диссертация. Фонды Казан. гос. ун-та, 1963.

52. Мак-Карделл В., Винзауэр В., Вильямс М. Природа естественных потенциалов обломочных горных пород. Сб. «Вопросы промысловой геофизики». Гостоптехиздат, 1957.

53. Мейер В. А. Каротаж скважин при разведке полиметаллических месторождений. Изд-во ЛГУ, 1960.

54. Мирошниченко Е. М. Влияние рН промысловой жидкости на величину диффузионно-адсорбционных потенциалов. Труды МИНХ и ГП, вып. 41. Гостоптехиздат, 1962.

55. Морозов Г. С. К вопросу о низком удельном сопротивлении нефтяных пластов. Грозненский нефтяник, № 1, 2, 1935.

56. Наука о коллоидах (под ред. Кройта). ИЛ, 1955.

57. Нейман Е. А. Прибор для перестроения градиента СП в кривую потенциалов СП. Труды МИНХ и ГП, вып. 41. Гостоптехиздат, 1962.

58. Нейман В. С., Румянцева Н. Н. К изучению поверхностной проводимости тонкопористых систем на водородных глинах. Труды ВНИИ (добыча), вып. 19. Гостоптехиздат, 1963.

59. Нечай А. М. Определение минерализации пластовых вод. Прикладная геофизика, вып. 8. Гостоптехиздат, 1952.

60. Нечай А. М. Определение литологических свойств горных пород по результатам геофизических исследований в скважинах. Прикладная геофизика, вып. 11. Гостоптехиздат, 1954.

61. Перников М. Ш. Определение пористости терригенных отложений разрезов Башкирии по диаграммам ПС. Прикладная геофизика, вып. 17. Гостоптехиздат, 1957.

62. Перьков Н. А. Интерпретация результатов каротажа скважин. Гостоптехиздат, 1962.

63. Перьков Н. А. О влиянии глинистости пород на ПС. Разведочная и промысловая геофизика, вып. 3. Гостоптехиздат, 1951.

64. Полак Л. С. О некоторых связях коэффициента мембранной э. д. с. и аномалии ПС с физическими свойствами коллекторов. Прикладная геофизика, вып. 16. Гостоптехиздат, 1957.

65. Румянцева Н. Н. Экспериментальное исследование потенциалов фильтрации. Труды ВНИИ, вып. 43. Изд-во «Недра», 1964.

66. Ряполова В. А. Методические указания по геофизическим методам исследования скважин на изысканиях ж. д. Оргтрансстрой, Трансжелдориздат, 1962.

67. Самарцев А. Г., Остроумов В. В. Потенциалы течения. Бюлл. нефт. геофиз., вып. II. ОНТИ, 1936.

68. Сафонцев А. А. Опыт литолого-стратиграфического расчленения мезозойских отложений месторождения Озек-Суат. Геология нефти и газа, № 12, 1959.

69. Справочник геофизика, т. II (под ред. С. Г. Комарова). Гостоптехиздат, 1961.

70. Справочник химика. Госхимиздат, 1953.

71. Стадников Г. Л. Глинистые породы. Изд. АН СССР, 1957.

72. Тамм И. Е. Основы теории электричества. Гостехтеоретиздат, 1954.

73. Уорсингтон А., Мельдо Р. Палетки для интерпретации диаграмм потенциалов собственной поляризации. Сб. «Промысловая геофизика», вып. 1. Гостоптехиздат, 1959.

74. Ханин А. А. Остаточная вода в коллекторах нефти и газа. Гостоптехиздат, 1963.

75. Хилл Х., Милберн И. Влияние глинистости и минерализации пластовых вод на диффузионно-адсорбционные потенциалы пород-коллекторов. Сб. «Вопросы промышленной геофизики». Гостоптехиздат, 1957.
76. Шапиро Д. А. О зависимости э. д. с. диффузии в скважинах от адсорбционных свойств пород. ДАН СССР, т. XXVII, № 4, 1951.
77. Шапиро Д. А. Некоторые вопросы теории диффузионно-адсорбционных потенциалов в буровых скважинах. Прикладная геофизика, вып. 19. Гостоптехиздат, 1958.
78. Шапиро Д. А., Нейман В. С. Об оценке пористости пластов по диаграммам ПС. Труды ВНИИ, вып. 29. Гостоптехиздат, 1960.
79. Шень Цип-Сян. Расчет теоретических кривых потенциалов собственной поляризации горных пород в неоднородной среде. Прикладная геофизика, вып. 32. Гостоптехиздат, 1962.
80. Эйрман И. Е. Об электрокаротажных параметрах. Прикладная геофизика, вып. 14. Гостоптехиздат, 1956.
81. Эйрман И. Е. О характере мембранной активности основных разновидностей осадочных пород Нижнего Поволжья. Прикладная геофизика, вып. 15. Гостоптехиздат, 1956.
82. Электрокинетические свойства капиллярных систем (авторы О. Н. Григоров, З. П. Кузьмина, А. В. Маркович, Д. А. Фридрихсберг). Изд. АН СССР, 1956.
83. Элланский М. М. Использование методов промышленной геофизики при поисках и разведке подземных хранилищ газа. Диссертация. Фонды МИНХ и ГП, 1963.
84. Энгельгардт В. Поровое пространство осадочных пород. Изд-во «Недра», 1964.
85. Colombo U., Salimbeni G., Sironi G., Veneziani Z. Differential electric logging. Geophysical prospecting, No. 1, 1959.
86. Debye P. Konzentrationselement und Brownsche Bewegung. Phys. Zeitschr., Bd. 18, S. 144, 1917.
87. Goundouin M., Scala C. Streaming potential and SP log. Trans. AIME, vol. 213, 1958.
88. Henderson P. Zur Thermodynamik der Flüssigkeitsketten. Zeitschr. Phys. Chem., Bd. 59, S. 118, 1907.
89. Hill H., Anderson A. Streaming potential phenomena in SP log interpretation. Trans. AIME, vol. 216, 1959.
90. Planck M. Über die Potenzialdifferenz zwischen zwei verdünnten Lösungen binärer Elektrolyte. Ann. Phys. und Chem., Bd. 40, 1890.
91. Segesman F. New SP correction charts. Geophysics, № 6, 1962.
92. Teorell T. Progress in bioph. and bioph. chemistry, vol. 3, London, Pergamon press., 1953.
93. Teorell T. Zeitschr. Elektrochem, Bd. 55, S. 460, 1951.
94. Wyllie M. An investigation of the electrokinetic component of the self — potential curve. Trans. AIME, vol. 192, 1951.
95. Wyllie M. A quantitative analysis of the elektrochemical component of the SP curve. Trans. AIME, vol. 186, 1949.
-



## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   | Стр.      |
|---|-----------|
| Введение . . . . .  | 3         |
| <b>Г л а в а I. Физические основы метода потенциалов собственной поляризации . . . . .</b>  | <b>5</b>  |
| § 1. Диффузионные э. д. с. . . . .  | —         |
| § 2. Диффузионно-адсорбционные э. д. с. . . . .   | 10        |
| § 3. Двойной электрический слой . . . . .   | 12        |
| § 4. Диффузионно-адсорбционная активность . . . . .   | 16        |
| § 5. Обменная адсорбционная способность . . . . .   | 21        |
| § 6. Экспериментальное изучение диффузионно-адсорбционных потенциалов . . . . .   | 24        |
| § 7. Зависимость диффузионно-адсорбционной активности от концентрации растворов и обменной адсорбционной способности образца . . . . .              | 27        |
| § 8. Зависимость диффузионно-адсорбционных э. д. с. от химического состава электролитов в растворах и катионов двойного слоя . . . . .              | 35        |
| Растворы NaCl и CaCl <sub>2</sub> . . . . .   | 38        |
| Растворы NaCl и NaHCO <sub>3</sub> . . . . .  | 42        |
| Растворы NaCl и NaOH . . . . .  | 44        |
| Влияние pH раствора, насыщающего породу . . . . .   | 45        |
| § 9. Некоторые вопросы теории . . . . .   | 47        |
| Использование уравнений Планка и Гендерсона для описания э. д. с. на границе дисперсной среды и внешнего раствора . . . . .                         | —         |
| Использование условия равновесия Доннана и уравнения Планка для описания диффузионно-адсорбционной э. д. с. на образце . . . . .                    | 54        |
| Решение дифференциального уравнения диффузии на границе адсорбирующих сред на основе гипотезы об избирательной адсорбции ионов . . . . .            | 58        |
| <b>Выводы . . . . .</b>   | <b>61</b> |
| § 10. О связи диффузионно-адсорбционной активности с параметрами, характеризующими глинистость и коллекторские свойства терригенных пород . . . . . | —         |
| Параметры, характеризующие содержание глинистого материала в терригенной породе . . . . .   | 64        |
| О связи между коэффициентом пористости и глинистостью терригенных коллекторов . . . . .   | 67        |
| Разделение коллекторов и неколлекторов . . . . .  | 70        |
| Связь диффузионно-адсорбционной активности терригенных пород с их адсорбционной способностью и глинистостью . . . . .                               | 74        |
| Связь диффузионно-адсорбционной активности терригенных пород с пористостью и проницаемостью . . . . .   | 83        |
| Связь между параметром A <sub>да</sub> и коэффициентом водонасыщения в терригенных глинистых коллекторах . . . . .                                  | 87        |

|   |            |
|---|------------|
| § 11. О связи диффузионно-адсорбционной активности с глинистостью и другими параметрами карбонатных пород . . . . .               | 89         |
| § 12. Диффузионно-адсорбционная активность и поверхностная проводимость . . . . .   | 92         |
| § 13. Потенциалы фильтрации . . . . .   | 101        |
| § 14. Окислительно-восстановительные э. д. с. . . . .   | 109        |
| Электродные потенциалы . . . . .  | —          |
| Окислительно-восстановительные химические реакции . . . . .   | 111        |
| Выводы . . . . .  | 112        |
| <b>Г л а в а II. Потенциалы собственной поляризации горных пород в скважинах . . . . .</b>  | <b>113</b> |
| § 15. Естественное электрическое поле в скважине . . . . .  | 114        |
| Статическая амплитуда $E_s$ потенциалов собственной поляризации   | 115        |
| Фактическая амплитуда $\Delta U_{СП}$ и связь ее со статической амплитудой . . . . .  | 117        |
| § 16. Теория поля двойных электрических слоев в скважине . . . . .  | 118        |
| Однородная среда . . . . .  | —          |
| Неоднородная среда . . . . .  | 123        |
| § 17. Влияние различных факторов на форму кривой $U_{СП}$ . . . . .   | 129        |
| Изменение диаметра скважины . . . . .   | —          |
| Кривая $U_{СП}$ в пакке пластов . . . . .   | 132        |
| Кривая $U_{СП}$ в высокоомном разрезе . . . . .   | 135        |
| Кривая $U_{СП}$ в коллекторе с неоднородным составом жидкости . .   | 136        |
| § 18. Связь между диффузионно-адсорбционной активностью и статической амплитудой $E_s$ . . . . .                                  | 137        |
| § 19. Поле фильтрационных э. д. с. . . . .  | 143        |
| § 20. Окислительно-восстановительные э. д. с. в скважинах . . . . .   | 146        |
| § 21. Искажения диаграмм потенциалов собственной поляризации в скважине . . . . .   | 147        |
| Блуждающие и теллурические токи . . . . .   | 148        |
| Влияние нестабильности электродного потенциала . . . . .  | 149        |
| Влияние гальванокоррозии . . . . .  | —          |
| <b>Г л а в а III. Геологическая интерпретация диаграмм потенциалов собственной поляризации . . . . .</b>                          | <b>151</b> |
| § 22. Основы интерпретации диаграмм $U_{СП}$ . . . . .  | —          |
| Определение линий глин . . . . .  | —          |
| Выделение пластов, определение границ пластов и величины амплитуды аномалии $\Delta U_{СП}$ . . . . .                             | 155        |
| Влияние на амплитуду $\Delta U_{СП}$ фактора времени и нефтегазонасыщенности породы . . . . .                                     | 160        |
| § 23. Использование диаграмм $U_{СП}$ для литологического расчленения разреза . . . . .   | 162        |
| Терригенный разрез . . . . .  | —          |
| Карбонатный разрез . . . . .  | 165        |
| § 24. Определение минерализации пластовых вод . . . . .   | 167        |
| § 25. Разделение пород на коллекторы и неколлекторы и оценка пористости и проницаемости пород в песчано-глинистом разрезе . . . . | 173        |
| Оценка коэффициента пористости коллекторов . . . . .  | 176        |
| Определение пористости по параметру $E'_s$ . . . . .  | 180        |
| Определение пористости по параметру $E_s$ . . . . .   | 181        |
| Оценка коэффициента проницаемости коллекторов . . . . .   | 182        |
| § 26. Комплексная интерпретация данных методов потенциалов собственной поляризации и сопротивлений . . . . .                      | 183        |
| Оценка продуктивности коллектора в песчано-глинистом разрезе  | —          |

|   |     |
|---|-----|
| Определение эффективной мощности тонкослоистой пачки в терригенном разрезе . . . . .  | 185 |
| Использование данных метода потенциалов собственной поляризации при определении пористости глинистых коллекторов по удельному сопротивлению . . . . .             | 188 |
| § 27. Комплексная интерпретация диаграмм потенциалов собственной поляризации и радиометрии . . . . .  | 189 |
| Оценка пористости и глинистости по диаграммам $U_{СП}$ и $I_{ny}$ . . .   | 190 |
| Определение глинистости по диаграммам $U_{СП}$ и $I_{\gamma}$ . . . . .   | 192 |
| О возможности совместной интерпретации диаграмм методов собственных потенциалов, сопротивлений, естественной радиоактивности и нейтронного гамма-метода . . . . . | 193 |
| § 28. Использование диаграмм $U_{СП}$ при изучении процессов осадконакопления . . . . .   | —   |
| Заключение . . . . .  | 196 |
| Литература . . . . .  | 199 |

---

*Вендельштейн Борис Юрьевич*

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЕЗОВ НЕФТЯНЫХ И  
ГАЗОВЫХ СКВАЖИН МЕТОДОМ  
СОБСТВЕННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

Редактор издательства *Н. Н. Кузьмина*  
Технический редактор *М. А. Кондратьева*  
Корректор *Н. А. Соколова*

---

Подписано к набору 20/XI 1965 г.

Подписано к печати 3/II 1966 г.

Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага № 2. Печ. л. 13.

Уч.-изд. л. 13,86. Т-00842. Тираж 2350 экз.

Зак. № 1343/501—3,7. Цена 68 коп. Индекс 1—1—1.

---

Издательство «Недра», Москва, К-12,

Третьяковский проезд, 1/19.

Ленинградская типография № 14

«Красный Печатник» Главполиграфпрома

Комитета по печати при

Совете Министров СССР.

Московский проспект, 91.