

УДК 550.837.75

А. В. КОЛБЕНКОВ

О ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА НА ПРИМЕРЕ ДАЛМАТОВСКОГО УРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

К л ю ч е в ы е с л о в а: радиоволновой метод; подземное выщелачивание; мониторинг.

Добыча урана способом подземного выщелачивания (ПВ) осуществляется на месторождениях, где представлены обводненные терригенные породы, зачастую залегающие на значительной глубине. В продуктивный пласт по системе скважин подается кислота, которая переводит минералы урана в растворимые соединения, после чего производится их откачка и последующее обогащение.

Исходное содержание урана в пласте определяется по данным гамма-каротажа. Использовать этот метод для оценки извлечения металла нельзя, поскольку радиий, по гамма-излучению которого изначально определяется количество урана, не затрагивается процессом выщелачивания. Производить контроль за процессом добычи представляется возможным косвенно, по степени проработки рудного тела окислителем (уран извлекается только из объема породы, в который проникла кислота). Закачиваемый в рудный горизонт раствор кислоты значительно

отличается по удельному электрическому сопротивлению от исходной пластовой воды, что создает предпосылки для применения электрических методов для контроля закисления.

При подготовке эксплуатационного участка месторождения базовый метод электрокаротажа — каротаж сопротивления (КС), а после начала процесса выщелачивания технологией добычи предусмотрено проведение индукционного каротажа. Для повышения надежности решения задачи существующий комплекс каротажа предлагается дополнить методом односкважинного радиоволнового профилирования (ОРВП). Автором приведены результаты экспериментального опробования ОРВП в условиях Далматовского уранового месторождения, а также сопоставление эффективности этого метода с используемыми.

Метод ОРВП развивается в ООО «Радионда LTD» с 1993 г. Совершенствование аппаратуры и алгоритмов обработки позволило успешно применять его для решения задач нефтяной и

рудной геофизики как совместно с межскважинными радиоволновыми измерениями, так и самостоятельно [1, 2, 5].

Каротаж способом ОРВП основан на зависимости амплитуды осевой электрической компоненты поля электрического диполя от электромагнитных характеристик среды. Комплексная амплитуда вертикальной компоненты электрического поля на оси электрического диполя (элемента dl переменного тока $I = I_0 \exp(-i\omega t)$) в безграничной однородной немагнитной среде определяется следующим выражением в [3]:

$$E_z = \frac{I_0 dl}{2\pi L^3} \times \frac{1}{\sigma - i\omega \epsilon_0 \epsilon} \times (1 - ikl) \times \exp(ikl), \quad (1)$$

где L — расстояние от центра диполя до точки наблюдения, $\sigma = 1/\rho$ — удельная электропроводность, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, f — частота колебаний, ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon_0 = 10^{-9} / (36\pi)$ Ф/м — электрическая постоянная.

Из (1) следует, что поле источника главным образом определяется волновым числом k :

$$k = k + ik = \sqrt{i\omega\mu_0(\sigma - i\omega\epsilon_0\epsilon)}, \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

В терригенных породах данного месторождения обычно выполняется условие квазипроводящей среды ($\sigma\omega\epsilon \ll 1$), поэтому коэффициент поглощения k главным образом определяется удельным электрическим сопротивлением ρ . При измерениях в неоднородных средах коэффициент поглощения k является интегральной величиной, суммирующей все локальные изменения поглощающих свойств пород околоскважинного пространства. Интегральные значения k называют «кажущимися коэффициентами поглощения», а значения ρ — «эффе́ктивными».

Далматовское месторождение урана приурочено к песчано-глинистым отложениям речной палеодолины позднеюрского возраста. Мощность рудного тела — 10–25 м, оно залегает на глубине более 400 м. Подстилающий и перекрывающий водоупоры представлены мощными пластами глин того же возраста.

Физико-геологическую модель рудного интервала до подачи окислителя можно представить как горизонтально-слоистую среду, сложенную маломощными, невыдержанными по простиранию водопроницаемыми (галечники, песчаники) и водонепроницаемыми (глины, алевролиты) пропластками. Породы залежи слабо дифференцированы по сопротивлению: максимальная электрическая контрастность водопроницаемых песков относительно непроницаемых глин составляет 1:4. Высокоомные песчано-гравийные отложения обладают сопротивлением 25–50 Ом·м, а назкоомные пласты с преобладанием глинистого материала 10–25 Ом·м. Сопротивление пластового флюида, равно как и сопротивление раствора скважины, составляет 6 Ом·м, водоупоров — 10–25 Ом·м.

Эксплуатационные блоки разбуриваются по гексагональной сети с расстоянием между скважинами 35–40 м. Закачные скважины в плане образуют правильные шестиугольники с откачной скважиной в центре.

Отбор керна не ведется, и литологическое расчленение разреза в каждой скважине производится на основании данных электрического каротажа КС, выполняемого двухполюсным градиент-зондом В0,05А0,5М. По корреляционной связи электрического сопротивления пород вмещающей толщи с коэффициентом фильтрации (K_f) производится разделение рудных интервалов на литолого-фильтрационные типы, что важно при подсчете извлекаемых запасов.

После бурения скважины обсаживаются колонной из непроводящего электрической ток полиэтилена, что исключает повторное применение методов КС и ПС и обуславливает необходимость применения бесконтактных электрических методов для режимных наблюдений.

Исследования методами ОРВП и ИК (как до закисления, так и после него) проведены в 15 скважинах, равномерно распределенных по центральному блоку Далматовского месторождения.

Измерения ОРВП выполнены с помощью осевой дипольной установки с электрическими антеннами. Схема измерений представлена на рис. 1. Излучатель (1), нагруженный на осевую электрическую антенну (2), создает в среде переменное элект-

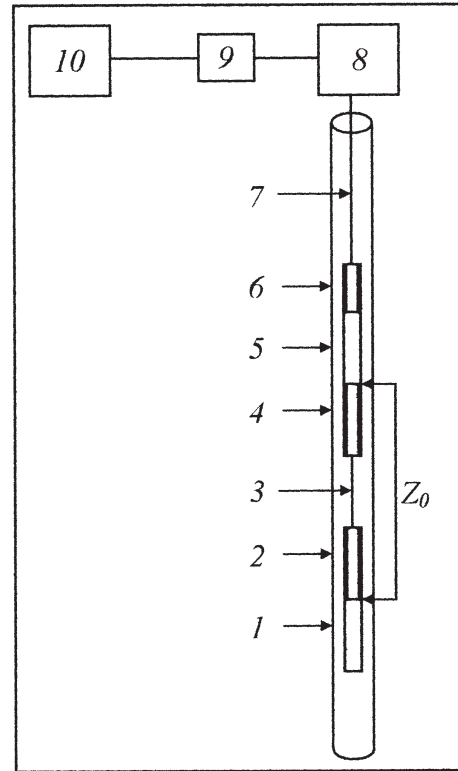


Рис. 1. Схема измерений ОРВП: 1 — излучатель; 2 — антенна излучателя; 3 — точка записи; 4 — антенна приемника; 5 — приемник; 6 — оптико-электрическая развязка; 7 — кабель; 8 — подъемник; 9 — ретранслятор; 10 — компьютер

ромагнитное поле. На фиксированном расстоянии от излучателя Z_0 , называемом разносом установки, находится приемник (5), также имеющий осевую электрическую антенну (4). Точка измерения (3) относится к середине разноса установки. Для исключения искажающего влияния антенного эффекта излучателя подсоединен к приемнику с помощью диэлектрического разноса, а приемник подсоединяется к кабелю (7) через оптико-электрическую развязку (6). Двусторонний информационный обмен через оптико-электрические развязки служит для получения данных, а также для управления параметрами работы приборов. Приемник, и излучатель автономно питаются от аккумуляторов. Измерения проводились на частоте 31 МГц, длина антенн 0,7 м при длине разноса $Z_0 = 4$ м, а при повторных измерениях (после закисления) длина разноса составляла 2 м.

Для индукционного каротажа использовался трехкатушечный зонд ИК-42, длина зонда составляла 1 м.

На рис. 2, а представлены результаты каротажа КС в открытом стволе, а также данные ОРВП и ИК, полученные в обсаженной пластиком скважине, до запуска процесса выщелачивания. Диаграмма ОРВП обладает той же степенью дифференцированности, что и КС, кривая индукционного каротажа несколько сглажена. Таким образом, для последующего мониторинга в качестве базы сравнения могут использоваться данные каротажа КС.

После подготовки блока запускается процесс ПВ: в закачные скважины подается раствор серной кислоты с концентрацией 3–15 г/л и удельным электрическим сопротивлением 0,1–0,3 Ом·м и производится извлечение ураносодержащего раствора из откачных скважин. При средней пористости пород 30% замена исходного флюида на низкоомный технологический раствор должна приводить к снижению удельного электрического сопротивления проницаемых пород от 25–50 Ом·м до нескольких Ом·м.

Через восемь месяцев после закисления были произведены повторные измерения методами ОРВП и ИК в тех же скважинах. На рис. 2, б приведена диаграмма ОРВП после закисления, наложенная на исходные данные. Аналогичные кривые для ИК представлены на рис. 2, в. При прокачке технологических рас-

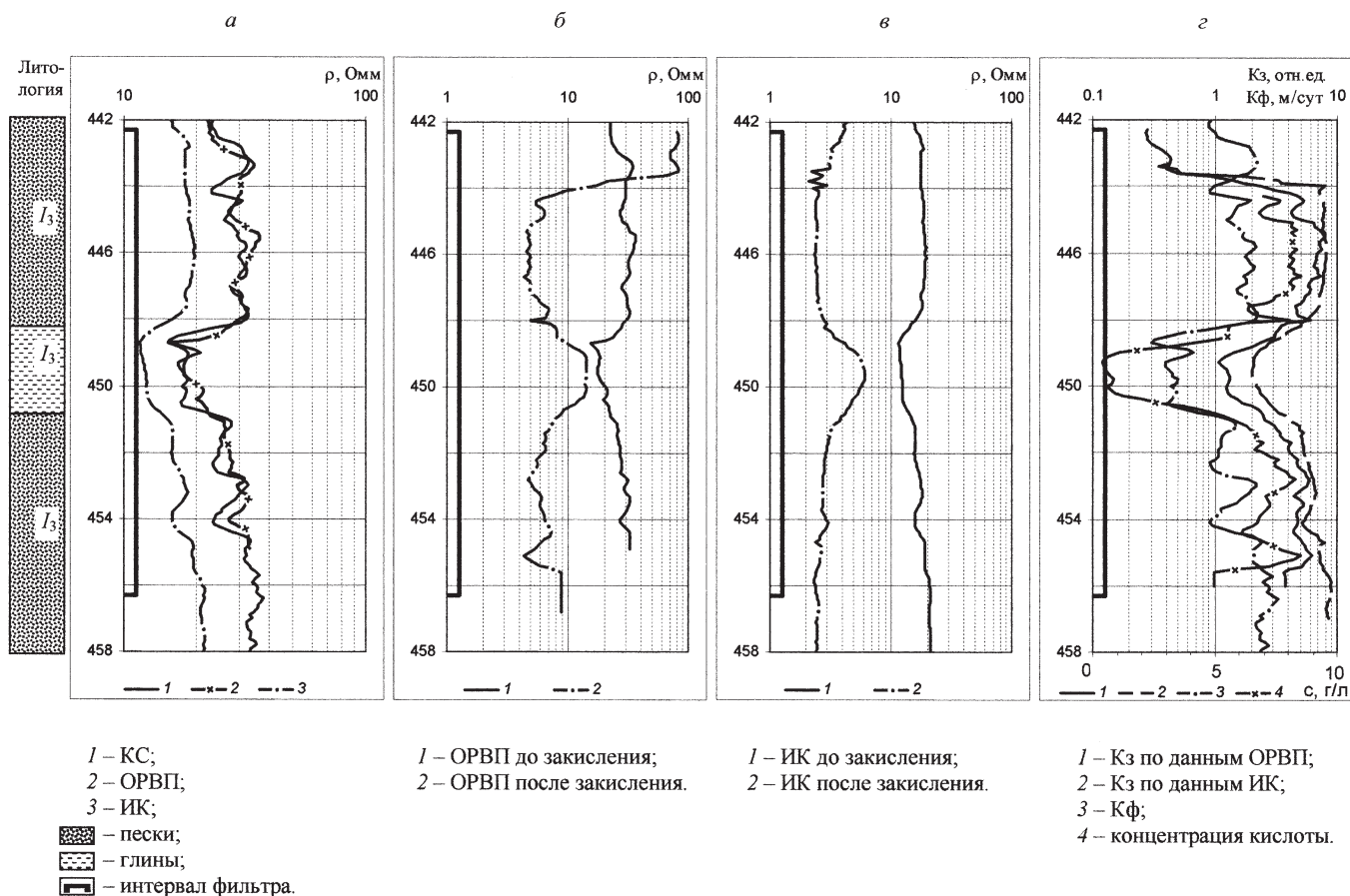


Рис. 2. Сравнение различных методов электрокаротажа в отдельной скважине: а — сопоставление данных ИК и ОРВП в полиэтиленовой обсадке с диаграммой КС в открытом стволе: 1 — КС в открытом стволе; 2 — ОРВП в полиэтиленовой обсадке; 3 — ИК в полиэтиленовой обсадке; 4 — пески; 5 — глины; б — интервал фильтра; б — диаграммы ОРВП до и после закисления: 1 — ОРВП до закисления; 2 — ОРВП после закисления; в — диаграммы ИК до и после закисления: 1 — ИК до закисления; 2 — ИК после закисления; г — сопоставления технологических параметров: 1 — диаграмма K_3 по данным ОРВП; 2 — диаграмма K_3 по данным ИК; 3 — диаграмма K_f ; 4 — концентрация кислоты

творов через рабочий горизонт поровое пространство проницаемых интервалов постепенно насыщается как кислотой, так и продуктами выщелачивания, что приводит к значительному увеличению минерализации. В результате сопротивление проницаемых песков падает на порядок до 3–5 Ом·м. Подобное не наблюдается в непроницаемых глинистых породах, и их сопротивление остается на прежнем уровне — 10–20 Ом·м. Как видно из диаграмм на рис. 2, б, в, помимо снижения контрастности электрических свойств пород, произошла инверсия геоэлектрической обстановки: сопротивление проницаемых песчаных пород упало ниже уровня глин. Таким образом, электрическое сопротивление пород определяется главным образом количеством содержащейся в них кислоты.

На рис. 2, г приведен график отношения сопротивлений до и после подачи окислителя (назовем этот параметр коэффициентом закисления — K_3), а также диаграмма коэффициента фильтрации, полученная пересчетом кривой КС по корреляционной зависимости. Диаграммы K_3 (по данным ОРВП) и K_f ведут себя идентично, что свидетельствует о полном согласовании приведенной геоэлектрической модели закисления с фильтрационной моделью, принятой на месторождении.

Попытаемся определить, как меняется концентрация серной кислоты вдоль скважины. Для этого воспользуемся известной связью этого параметра с сопротивлением раствора. Используя формулу Арчи, рассчитаем по данным ОРВП* сопротивление технологического раствора.

Запишем формулу Арчи для исходного состояния рудного горизонта:

$$\frac{\rho_n}{\rho_\phi} = K_n^{-m}, \quad (3)$$

где ρ_n — удельное электрическое сопротивление пород по электрическому каротажу; ρ_ϕ — сопротивление порового флюида; K_n — коэффициент пористости; m — параметр, характеризующий структуру порового пространства.

После воздействия кислоты на породы (3) формула будет иметь вид:

$$\frac{\rho_n^*}{\rho_\phi^*} = K_n^{-m}, \quad (4)$$

где ρ_n^* и ρ_ϕ^* — удельное электрическое пород и порового флюида после закисления.

Если предположить, что структура порового пространства для каждого отдельного пласта остается неизменной, то правые части выражений (3) и (4) равны, и можно получить формулу для оценки сопротивления раствора в пласте:

$$\rho_\phi^* = \frac{\rho_n^* \times \rho_\phi}{\rho_n}. \quad (5)$$

Используя корреляционную зависимость [4], сопротивление технологического раствора можно сопоставить с концентрацией серной кислоты.

Построенная таким образом диаграмма концентраций приведена на рис. 2, г. Для пород с сопротивлением по ОРВП после закисления в 5 Ом·м сопротивление раствора будет составлять около 0,5 Ом·м, что соответствует содержанию кислоты 8 г/л. Аналогично, сопротивлению пород в 15 Ом·м будет соответствовать содержание кислоты менее 2 г/л.

Корректность использованного перехода от сопротивлений к концентрациям подтверждается тем фактом, что полученные

содержания кислоты достаточно близки к технологическим данным: в пределах изученного блока месторождения максимальные концентрации в скважинах составляют 16–20 г/л.

Распределение концентрации кислоты по скважине хорошо согласуется с графиками коэффициентов K_{ϕ} и K_3 . Пластам с высокими содержаниями серной кислоты и значениями K_{ϕ} соответствуют высокие значения коэффициента закисления, т. е. значительные изменения сопротивления, связанные с проникновением кислоты, произошли в пластах с хорошими фильтрационными параметрами, и наоборот.

Аналогичные результаты получены и при анализе данных ИК, однако, как следует из рис. 2 ($a-\theta$), диаграммы ИК в данных геоэлектрических условиях более сглаженные по сравнению с таковыми по данным КС и ОРВП. Помимо более высо-

кой разрешающей способности по вертикали, рабочий диапазон сопротивлений пород у метода ОРВП шире, чем у ИК. Помимо контроля закисления рудного горизонта, технология добычи предусматривает выявления возможных утечек технологического раствора в надрудную толщу, нередко обладающую высокими значениями сопротивлений (базальты, мерзлые породы), и в этом случае применение радиоволнового метода более предпочтительно.

В результате проведенных исследований на практике показана возможность количественной оценки фактического закисления пород рудного интервала. Для этих целей можно рекомендовать включить в комплекс геофизических исследований наряду с индукционным каротажем метод ОРВП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов Б.Ф., Истратов В.А., Лысов М.Г. Способ радиоволнового межскважинного просвечивания. Патент России № 2084930 от 22.07.93 // Изобретения. М.: 2000. 156 с.
2. Истратов В.А. Радиоволновой метод для мониторинга технологических процессов в нефтяных скважинах // Новейшие достижения в области геофизических исследований скважин. Сб.тез. 4-го китайско-российского симпозиума. М., 2006, 259 с.
3. Кауфман А.А., Курилло В.Н. Введение в теорию диэлектрического каротажа при возбуждении поля электрическим диполем // Электромагнитные поля в геофизических методах исследования. В. 54. М.: Наука, 1969. 225 с.
4. Кобранова В.Н., Физические свойства горных пород. Гостехиздат, М.: 1962, 490 с.
5. Лях Е.В., Истратов В.А., Перекалин С.О. Опыт высокочастотных электромагнитных исследований в скважинах со стеклопластиковой обсадкой (СПОТ) для мониторинга процесса разработки нефтяных месторождений // Каротажник. В. 1 (142).Тверь, 2006. 184 с.

Российский государственный
геологоразведочный университет
(117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая 23;
e-mail: krikoon@list.ru)
Аспирант
Рецензент — В.К. Хмелевской