Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XCI, 1982 г.

УДК 551.491.55 + 016.3

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЗАРЯЖЕННОГО ТЕЛА НА УЧАСТКАХ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТНО-МИГРАЦИОННЫХ РАБОТ

В.В.ЩЕМЕЛИНИН

При гидрогеологических изысканиях метод заряженного тела может быть использован для определения направления и действительной скорости фильтрации подземных вод. Теория, методика проведения работ и интерпретации результатов наблюдений в случае аппроксимации подвижной зоны электролита эквипотенциальным проводником в пористой среде освещена в работах [I, 2, 4].

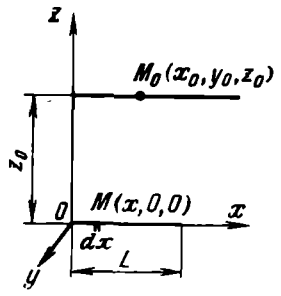


Рис. Схема к выводу формулы (6)

К сожалению, на практике мы имеем дело с проводниками конечной проводимости и, как правило, не можем считать тело эквипотенциальным и пользоваться результатами вышеупомянутых исследований.

Рассмотрим проводник, помещенный в однородное полупространство с удельным электрическим сопротивлением ρ (рис.I). Удельное сопротивление проводника ρ_0, его длина L, глубина залегания z_0. При протекании электрического тока, подводимого к точке O, на элементе проводника dx происходит падение потенциала

$$dU = -i_x r\,dx, \qquad (I)$$

где i_x - ток в элементе dx; r - сопротивление единицы длины проводника.

С другой стороны изменение протекающего тока на этом элементе

$$-di_x = U\frac{dx}{g}, \qquad (2)$$

где g - сопротивление стеканию тока на единицу длины проводника.

Из уравнений (I) и (2) имеем

$$\frac{d^2 i_x}{dx^2} = \frac{r}{g} i \,, \tag{3}$$

следовательно,

$$i_x = i_0 (A e^{-\alpha x} - B e^{\alpha x}), \tag{4}$$

где i_0 - величина тока, подводимого к проводнику;

$A = e^{\alpha L}/(e^{\alpha L} - e^{-\alpha L})$; $B = e^{-\alpha L}/(e^{\alpha L} - e^{-\alpha L})$; $\alpha = \sqrt{r/g}$.

Величину тока, стекающего с любого элемента проводника dx, найдем как скорость изменения величины i_x по проводнику в направлении x:

$$i_C = -\frac{di_x}{dx} = i_0 \alpha (A e^{-\alpha x} + B e^{\alpha x}). \tag{5}$$

Потенциал $dU = \frac{i_C \rho dx}{2\pi R}$, создаваемый таким проводником в точке M_0 (x_0, y_0, z_0) на границе раздела сред находим, пользуясь принципом суперпозиции полей, путем интегрирования выражения для потенциала, создаваемого малым элементом проводника dx в точке M_0 в пределах от 0 до L

$$U = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^L \frac{i_C}{R} dx = \frac{\alpha \rho i_0}{2\pi} \int_0^L \frac{A e^{-\alpha x} + B e^{\alpha x}}{R} \,, \tag{6}$$

где $R = \sqrt{(x_0 - x)^2 + y_0^2 + z_0^2}$

В дальнейших рассуждениях обратимся к выражению градиента потенциала в направлении x_0, поскольку на кривых градиента наиболее четко выделяются характерные точки потенциальной функции:

$$\frac{\partial U}{\partial x_0} = \frac{\alpha \rho i_0}{2\pi} \int_0^L \frac{(A e^{-\alpha x} + B e^{\alpha x})(x - x_0)}{R^3} dx \,. \tag{7}$$

Анализ результатов численных расчетов, проведенных по формуле (7), позволил построить диаграмму (рис.2), на которой выделяются три области в зависимости от значений параметров ρ/ρ_0 и $L/2z$ I - область, в которой зону электролита можно аппроксимировать эквипотенциальным проводником; II - область, в которой тело аппроксимируется проводником конечной проводимости; III - область, в которой поле, создаваемое проводником, идентично полю точечного источника, а изменение координат характерных точек поля потенциала на поверхности практически не фиксируется.

Таким образом, область эффективного применения метода попадает в довольно жесткие рамки. К тому же, очевидно, что оптимальной является постановка эксперимента с максимально возможными значениями параметра ρ/ρ_0. В этом случае, однако, возникает плотностной градиент $\Delta\bar{\gamma}$, способствующий погружению тела электролита (повышенной плотности) в глубь водоносного горизонта. Скорость этого погружения оценивается по формуле [2]

$$v_\gamma = k \Delta\bar{\gamma}/n \,, \tag{8}$$

где k - коэффициент вертикальной фильтрации; n - пористость пород.

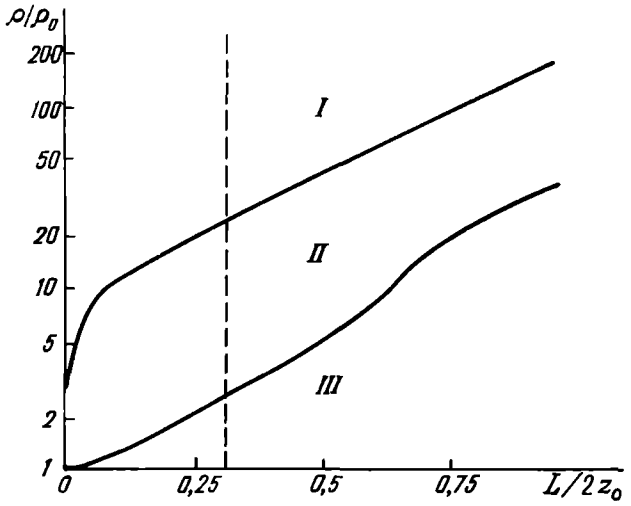


Рис.2. Диаграмма диагностики и выбора схемы интерпретации результатов эксперимента

Оценим величину параметра ρ/ρ_0, при которой явлением плотностной конвекции можно пренебречь. Из рис.3 следует, что погрешность в определении координаты нулевого значения градиента потенциала Δx_0^0 меньше 5–10 % при угле падения соляного тела $\beta < 2\text{–}3^0$ [5]. Отсюда $v_y/v_g < \sin\beta \simeq 0{,}04$ (здесь v_g - действительная скорость фильтрации). Подставляя в приведенные соотношения реально возможное значение $v_g = 2 \div 3$ м/сутки, получим $\Delta\bar{\gamma} < 0{,}004$, что соответствует условию $\rho/\rho_0 < 30 \div 40$.

Однако, в реальной ситуации мы имеем дело с породами, имеющими вертикальную проницаемость как минимум в 5–10 раз меньшую горизонтальной, следовательно, и предельно допустимое значение параметра ρ/ρ_0 увеличивается до 150–200.

В работе [4] указывается, что уверенное слежение за изменением поля потенциалов эквипотенциального проводника на дневной поверхности может быть достигнуто, если глубина залегания тела меньше, чем его длина, а именно $L/z_0 > 0{,}6 \div 0{,}7$.

Это ограничивает применимость метода частью диаграммы (см. рис.2, справа от пунктирной линии).

В натурных условиях: $v_g \approx 2 \div 3$ м/сутки, продолжительность опыта - несколько суток (в противном случае сильное влияние оказывают дисперсионные, а затем и диффузионные явления, приводящие к сильному „размазыванию" соляного тела), - имеем $z = 7 \div 10$ м. Очевидно, что для неэквипотенциального тела эта величина является максимально возможной.

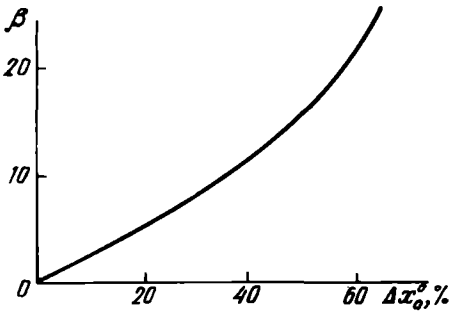


Рис.3. Зависимость погрешности в определении параметра x_0^0 от угла β между заряженным проводником и осью x

Использование диаграммы (см.рис.2) удобно при диагностике и выборе расчетной схемы интерпретации результатов эксперимента. Для эквипотенциального тела методика интерпретации достаточно подробно разработана [1, 4]. Для проводника конечной проводимости

обработка результатов проводится, исходя из следующих соображений. В точке x_0^0 на профиле, совпадающем с направлением движения подземных вод ($y_0 = 0$), при длине тела L_n на момент времени t_n отношение $\partial U/\partial x = 0$, т.е.

$$J = \int_0^L \frac{(Ae^{-\alpha x} + Be^{\alpha x})(x_0 - x)}{\left(\sqrt{(x_0^0 - x)^2 + z_0^2}\right)^3}\, dx. \qquad (9)$$

Для того, чтобы выполнялось равенство (9), необходимо величину L заменить искомой величиной L_n, которая легко определяется подбором с помощью ЭВМ. Действительная скорость фильтрации в таком случае $v_g = L_n/t_n$.

Предлагаемая схема интерпретации исследовалась на чувствительность к изменению отдельных параметров. Оказалось, что наиболее чувствительна формула (9) к ошибкам в определении параметра x_0^0 (особенно в области больших L). При небольших значениях Δx_0^0 (в пределах 10 %) ошибка в определении L не превышает 20 %, при дальнейшем росте Δx_0^0 величина ΔL быстро увеличивается, достигая 40 % уже при $\Delta x_0^0 = 15$ % (рис.4,а). Таким образом, точность определения координаты x_0^0 требует особого внимания при проведении полевых измерений. В натуре мы можем обеспечить практически любую точность определения величины x_0^0 путем непосредственного отыскания координаты нулевого значения градиента. Однако, в силу технических сложностей, реальная погрешность Δx_0^0 составляет примерно 3-5 %.

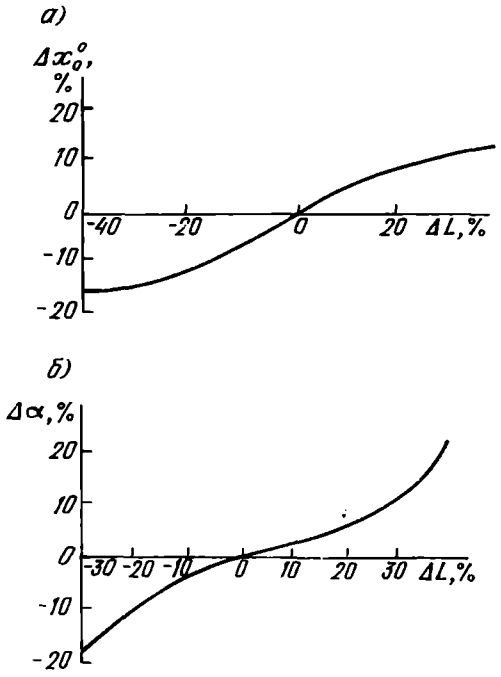


Рис.4. Зависимость погрешности в определении величины L от погрешности измерений параметров x_0^0 (а) и α (б)

Меньшее влияние на результаты интерпретации оказывает изменение параметра α (рис.4,б), хотя при малых $\Delta\alpha$ (около 10 %) зависимость проявляется достаточно резко.

В качестве примера использования описанной методики приведем результаты эксперимента, проведенного в сеноман-альбских песках на Лебединском карьере Курской магнитной аномалии (рис.5). Глубина заряда 1,5 м. Скважина была обсажена трубой из электроизолирующего материала. Этот опыт интересен тем, что при данном параметре α (а он равнялся примерно 10) мы имеем дело сначала с эквипотенциальным телом (при $L/2z < 0{,}2$), а затем с неэквипотенциальным (см. рис.2), что дает возмож-

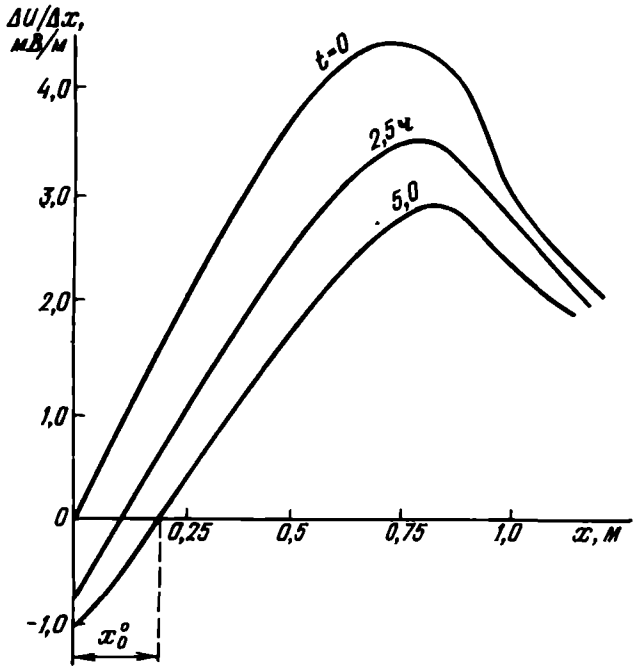


Рис.5. Распределение поля градиента потенциала над заряженным телом электролита во времени

ность сравнить результаты обработки эксперимента по двум различным схемам. Так, в первом случае получаем v_g = = 2,3 м/сутки.

Во втором случае по формуле (8), подставляя x_0^o = 0,2 м при t = 5 ч, α = I0 и z_0 = I,5 м, подбором определяем, что условие J = 0 выполняется при L = 0,5 м. Отсюда v_g = 0,5/5 = = 2,4 м/сутки. Действительная скорость фильтрации, вычисленная с использованием данных резистивиметрических измерений, составила 2,4 м/сутки.

Аппроксимация тела (на протяжении всего опыта) эквипотенциальным проводником делает искомую величину действительной скорости весьма неопределенной: через 2,5 ч после начала опыта v_g = 2,3 м/сутки, а через 5 ч v_g = 0,8 м/сутки.

Итак, очевидно, что метод заряда в естественном потоке дает вполне удовлетворительные качественные и количественные результаты лишь при правильной диагностике эксперимента и, что самое главное, при соблюдении указанных выше ограничений, удовлетворить которые на практике удается крайне редко.

Значительно эффективнее использование метода заряда при проведении опытных наливов индикатора (NaCl) в планово-анизотропных породах, когда существенный интерес представляют сравнительные оценки скоростей фильтрации в различных направлениях. Это особенно важно для выбора оптимального расположения наблюдательных скважин миграционного куста. Используя данные о форме изолиний, легко определить направление преимущественного продвижения индикатора. Так, при проведении опытов в меловых породах вблизи хвостохранилища Лебединского ГОКа Курской магнитной аномалии, наблюдения за смещением эквипотенциалей электрического поля по различным направлениям от центральной скважины позволили оценить степень фильтрационной анизотропии опробуемой толщи и преобладающее направление переноса (рис.6).

Интересным представляется применение метода заряда в ходе налива индикатора на слабопроницаемый слой, что дает возможность определить коэффициент вертикальной фильтрации последнего. Действительно, если в

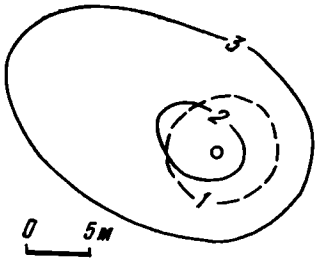


Рис.6. Характер изменения формы эквипотенциали (5,6 мВ) при наливе раствора электролита NaCl в скважину
1 – до запуска индикатора; 2 – сразу после запуска; 3 – через 30 мин после запуска

скважину с фильтром в нижней части, пробуренную до слабопроницаемого пласта, налить раствор электролита, то площадь ω_T образовавшегося на кровле пласта дискообразного тела будет увеличиваться, пока расход нетекания через слой не окажется равным расходу налива. Определив с помощью метода заряда величину ω_T и зная напоры на кровле и подошве пласта, можно оценить коэффициент вертикальной фильтрации слабопроницаемого слоя.

Важным достоинством предлагаемой модификации метода является отсутствие влияния плотностного градиента и ограничений по ρ/ρ_0.

Как показано в работе [3], с погрешностью до 0,1 можно считать координату x_{max} максимальных значений градиента совпадающей с контуром тела при условии $z_0/r_T \leqslant 0{,}5$, которое как правило на практике выполняется.

Приведенный материал позволяет считать метод в традиционной постановке мало эффективным для определения действительной скорости естественного потока. В то же время, метод способствует повышению информативности опытных гидрогеологических работ и, несомненно, заслуживает внимания с точки зрения дальнейшего исследования его возможностей в этой области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев Б.К. Геофизические методы изучения движения подземных вод. М., Госгеолтехиздат, 1963.

2. Мироненко В.А., Румынин В.Г., Учаев В.К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах. Л., Недра, 1980.

3. Родионов П.Ф. Электроразведка методом заряда. М., Наука, 1971.

4. Семенов А.С. Теория метода заряженного тела в применении к эквипотенциальным проводникам. – В кн.: Геофизика. Материалы ВСЕГЕИ, 1948, вып. 13.

5. Справочник геофизика / Ред. А.Г.Тархов. М., Гостехиздат, 1963.