записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
ена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. /XXX, 1980 г.

УДК 551.491.55+016.3

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ СКОРОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД МЕТОДОМ РЕЗИСТИВИМЕТРИИ

В.В.ШЕМЕЛИНИН

Для прогнозов переноса вещества от бассейнов промстоков необходимо знать плановое и профильное распределение скоростей фильтрации в водоносном горизонте. Расчет поля скоростей фильтрации по картам гидроизогипс с использованием данных опытно-фильтрационных работ не всегда приводит к надежным результатам вследствие недостаточной детальной изученности фильтрационных параметров водоносного горизонта. Поэтому особое значение приобретают гидрогеофизические методы оценки скоростей фильтрации, в частности резистивиметрия. Между тем этот метод в стандартной постановке [1-3] не учитывает ряда искажающих факторов, к наиболее важным из которых следует отнести эффекты вертикального перемещения индикатора вдоль ствола скважины, вызванные плотностной конвекцией.

Возникновение градиента плотности, приводящего к вертикальным конвективным токам в обводненном объеме скважины, обуславливается двумя основными причинами: неравномерным начальным введением индикатора в скважину, когда более концентрированный раствор оказывается в верхней части скважины, и частичным выносом раствора из фильтрующих интервалов подземным потоком и, следовательно, расположением более плотных слоев жидкости над менее плотными.

В этих условиях равновесие жидкости в скважине неустойчиво и малейшее возмущение ведет к вертикальному перемещению слоев с различной концентрацией. Такое, чаще всего не прогнозируемое, перераспределение массы вещества в скважине не учитывается в расчетной схеме и поэтому, естественно, влияет на точность определения искомых параметров.

Для количественной оценки факторов плотностной дифференциации вещества в скважине была проведена серия лабораторных экспериментов. «Глухую» (нефильтрующую) часть скважины имитировали трубы диаметром 70 мм. Более плотный раствор с концентрацией C вводился в верхнюю часть трубы, а в нижней ее части, где находился раствор с исходной концентрацией C_0, при помощи двух установленных на расстоянии 20 см друг от друга резистивиметров фиксировалось увеличение концентрации, вызванное плотностной

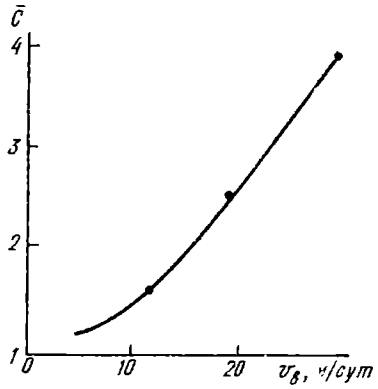


Рис. афик зависимости $v_в$ от $\bar{C}$

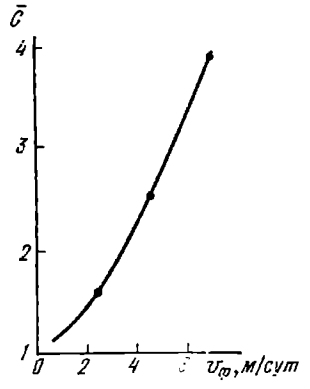


Рис.2. График зависимости $v_ф$ от $\bar{C}$

конвекцией. Опыты проводились при относительном перепаде концентраций $\bar{C} = C/C_0$, равном I,5; 2,5; 4,0. Скорости вертикального перемещения $v_в$ более плотной жидкости рассчитывались по времени появления в точках измерения первых порций индикатора. Опыт показал, что скорость вертикального перемещения более плотной жидкости растет с ростом $\bar{C}$, причем эта зависимость проявляется тем резче, чем больше (в указанных выше пределах) $\bar{C}$ (рис.I).

Важно отметить, что рассоление верхней части скважины, обусл ленное плотностной конвекцией, в натурных условиях может быть истолковано как следствие горизонтальной фильтрации в пласте. Так, для описанных опытов фиктивная скорость фильтрации $v_ф$ (рассчитанная по уменьшению концентрации в верхней части трубы) находится в обратной зависимости от величины $\bar{C}$ (рис.2).

Приведенные графики дают, конечно, лишь качественное представление о процессе плотностной конвекции, однако они хорошо иллюстрируют возможность значительного влияния этого эффекта на распределение индикатора в скважине.

С явлением плотностной конвекции в скважинах при проведении полевых исследований нам пришлось сталкиваться неоднократно. Зачастую оно проявлялось настолько сильно, что против зоны активной горизонтальной циркуляции рассоление вообще не фиксировалось.

Искажающее влияние плотностной конвекции индикатора на определение скорости фильтрации в полевых условиях хорошо демонстрирует опыт, проведенный на одной из наблюдательных скважин вблизи хвостохранилища Лебединского ГОКа. Опыт ставился в двух вариантах: I) индикатор распределялся по всему стволу скважины (рис.3,а); 2) индикатор вводился только в нижнюю часть скважины – от верхней границы фильтра до забоя (рис.3,б). Результаты расчетов скоростей фильтрации по вариантам заметно различались: 0,2 и 0,6 м/сут. Заниженное значение скорости фильтрации в первом случае объясняется тем, что вынос индикатора из прифильтровой зоны частично компенсировался привносом индикатора сверху за счет процессов плотностной конвекции.

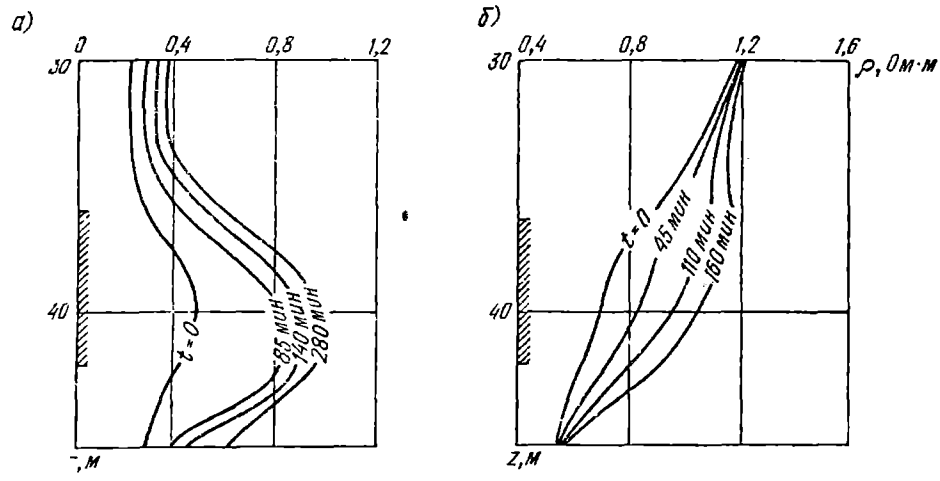


Рис.3. Характер изменения удельного электрического сопротивления ρ вдоль ствола скважины во времени (на кривых – время с момента засоления) в первом (а) и втором (б) вариантах опыта

Из сказанного ясно, что плотностная конвекция может существенно влиять на точность определения скорости фильтрации резистивиметрическим методом и поэтому, несомненно, должна учитываться при постановке опытов и интерпретации их результатов.

Во избежание подобных ошибок следует несколько изменить методику обработки первичного материала. Будем считать, что уменьшение концентрации раствора в скважине выше фильтра вызвано только вертикальным перемещением соли вниз. Здесь надо отметить, что изменение концентрации в тех частях скважины, где отсутствует горизонтальная фильтрация, свидетельствует в первую очередь о наличии плотностной конвекции. Тогда количество соли, поступившее из верхней части скважины к фильтру за некоторый промежуток времени Δt,

$$V_{\Delta t} = \pi r^2 (S_n - S_{n-1}) , \qquad (1)$$

где r – радиус скважины; S_n и S_{n-1} – площади, ограниченные осью глубин и резистивиметрическими кривыми, соответственно на моменты времени t_n и t_{n-1} (в пределах верхней части скважины до фильтра).

Считая, что количество соли $V_{\Delta t}$, полученное из выражения (1), распределилось в зоне фильтра равномерно, можно ввести поправку ΔC в полученное значение концентрации C в области фильтра:

$$\Delta C = -\frac{V_{\Delta t}}{\pi r^2 m} , \qquad (2)$$

где m – длина фильтрующей части скважины.

Для правильного определения мощности фильтрующего интервала m необходимо иметь данные о конструкции скважин. Однако эффективная длина фильтра может измениться за счет кольматации: поэтому ее целесообразнее всего определять по данным расходометрического каротажа. Расходометрия

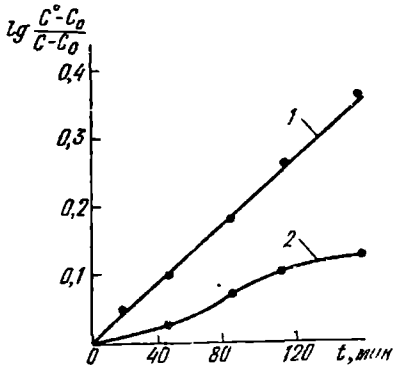


Рис.4. Графики рассоления, построенные по исправленным значениям концентраций (1) и по результатам измерений (2)
C^0 – концентрация индикатора при $t = 0$

может дать также сведения о качестве обсадки скважины и о возможных участках дополнительной фильтрации. Например, график рассоления, построенный непосредственно по результатам наблюдений (рис.4, кривая 2), не позволяет однозначно определить скорость фильтрации. Наблюдается резкое различие закономерности рассоления от теоретической (явление, с которым исследователи нередко сталкиваются на практике). В то же время график рассоления, построенный по исправленным значениям концентрации (рис.4, кривая I), хорошо аппроксимируется прямой линией, а скорость фильтрации, рассчитанная на его основе (0,6 м/сут), практически совпадает со скоростью, определенной по уклону поверхности подземных вод в данном районе.

Однако наиболее надежным является исключение эффекта плотностной конвекции непосредственно во время измерений: для этого необходимо проводить наблюдения за рассолением скважины в изолированных по вертикали интервалах. Такая методика позволяет регистрировать опреснение, вызванное только горизонтальной фильтрацией в пласте. Интервалы изолируются установкой выше и ниже резистивиметра эластичных пробок, плотно прилегающих к стенкам скважины. Вся система с грузом опускается в предварительно засоленную часть скважины и устанавливается на заданной глубине, затем через некоторые промежутки времени проводят определение сопротивления воды в изолированном интервале.

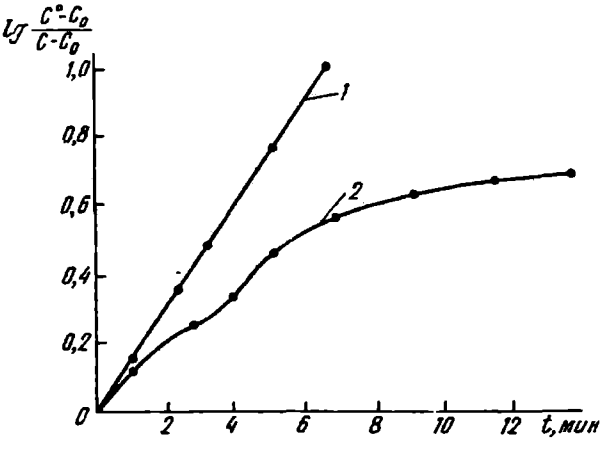


Рис.5. Графики опреснения, построенные по результатам наблюдений в изолированных интервалах (1) и по обычной методике (2)

Результаты измерения в скважине, вскрывшей трещиноватые мела (рис.5), показывают, что изменение концентрации хорошо аппроксимируется прямой линией (рис.5, прямая I). Рассчитанная по этим данным скорость фильтрации 26,8 м/сут, что близко к скорости, полученной по параметрам откачки. Для сравнения было проведено определение скорости без изоляции интервалов. Скорость филь-

рации в этом случае оказалась сильно заниженной и менялась в зависимости от выбора расчетного периода времени, от 18,0 м/сут в начале опыта до 8,0 м/сут в конце его (*рис.5, кривая 2*).

Определение скоростей фильтрации по измерениям в изолированных интервалах особенно эффективно в тех случаях, когда скважина вскрывает неоднородные в фильтрационном отношении породы, так как оно позволяет получить дифференцированные по вертикали значения скоростей, свободные от влияния плотностной конвекции. Однако при этом возникают сложности, связанные, в основном, с техникой изоляции интервалов и, что самое главное, резко увеличивается время измерений. Поэтому здесь целесообразно применять методику определения послойных скоростей фильтрации, основанную на совмещении данных расходометрического и резистивиметрического каротажа при их обработке.

Идея такой комплексации заключается в следующем. Расходометрический каротаж дает возможность выделить интервалы поглощения m_i, причем удельный дебит водопоглощения каждого из этих интервалов пропорционален его коэффициенту фильтрации, а следовательно и скорости фильтрации v_i. С другой стороны, по изменению общего количества индикатора в скважине на различные моменты времени можно определить некоторую фиктивную $v_ф$ скорость для всей обводненной части скважины. Перераспределив значение $v_ф$ пропорционально удельным расходам каждого из фильтрующих интервалов, можно определить скорость фильтрации v_i. При этом автоматически исключается влияние вертикальных перемещений индикатора вдоль ствола скважины на результаты резистивиметрических измерений.

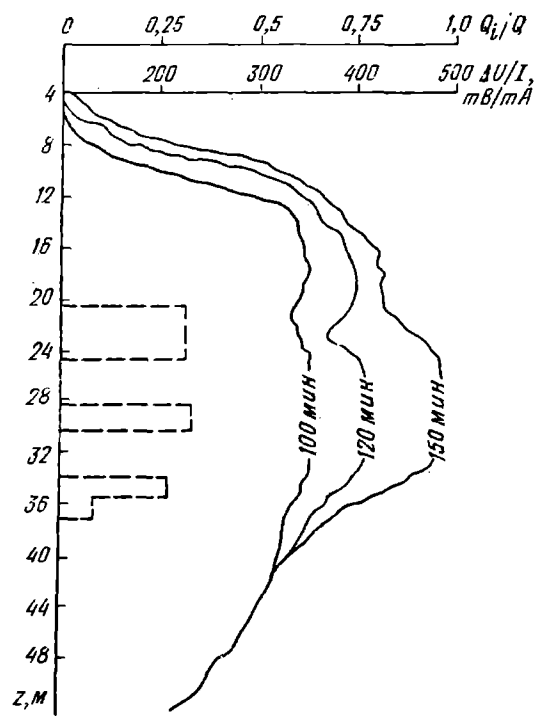


Рис.6. Расходограмма и резистивиграмма по одной из наблюдательных скважин

ΔU – разность потенциалов на измерительных электродах резистивиметра; I – ток в питающей цепи

Интерпретация полученных данных проводится в следующем порядке. По резистивиметрическим кривым на разные моменты времени t_n определяется фиктивная скорость фильтрации $v_ф$, при которой по всему стволу скважины за время Δt количество индикатора изменится на

величину $\Delta V = V_{t_n} - V_{t_{n-1}}$. Скорость $v_ф$ вычисляется по известной формуле [3]:

$$v_ф = \frac{3{,}62r}{\xi\,(t_n - t_{n-1})}\,\lg\frac{V_{t_n} - V_0}{V_{t_{n-1}} - V_0} = \frac{3{,}62r}{\xi\,(t_n - t_{n-1})}\,\lg\frac{\left(\sum_{j=1}^{k} c_j \Delta l_j\right)_{t_n} - \left(\sum_{j=1}^{k} c_j \Delta l_j\right)_0}{\left(\sum_{j=1}^{k} c_j \Delta l_j\right)_{t_{n-1}} - \left(\sum_{j=1}^{k} c_j \Delta l_j\right)_0} \qquad (3)$$

где r – радиус скважины; ξ – коэффициент искажения потока; V_0 – количество индикатора в скважине в естественных условиях, c_j – концентрация индикатора в j-м интервале скважины мощностью Δl_j $\left(\sum_{j=1}^{k} \Delta l_j = h_0\right)$; h_0 – глубина скважины; k – количество интервалов разбивки скважины по глубине.

Далее по кривой расходометрического каротажа определяются мощности m_i и расходы Q_i отдельных поглощающих слоев. Расчетная же формула для определения скорости фильтрации в i-м интервале имеет вид

$$v_i = \frac{Q_i\, h_0}{Q\, m_i}\, v_ф \qquad (4)$$

В качестве примера использования рассмотренной методики приведем результаты совместной обработки резистивиметрии и расходометрии по наблюдательной скважине, вскрывшей трещиноватые мела (рис.6). Опыт проводился во время откачки из центральной скважины. По данным расходометрии выделяются четыре фильтрующих зоны мощностью m_1 = 4,2 м, m_2 = 2,6 м, m_3 = I,8 м, m_4 = 2,0 м с расходами поглощения, равными соответственно Q_1 = 0,3I, Q_2 = = 0,33, Q_3 = 0,27, Q_4 = 0,09 (в долях от общего расхода налива). Рассчитанная по резистивиметрическим данным $v_ф$ = I,5 м/сут; скорости фильтрации в каждом из фильтрующих интервалов, определенные по формуле (4), v_1 = 5,5 м/сут, v_2 = I0,8 м/сут, v_3 = II,3 м/сут, v_4 = 3,4 м/сут. Отмечается хорошая сходимость полученных результатов с результатами определения скоростей фильтрации по измерениям в изолированных интервалах этой же скважины.

Выводы

I. Явление плотностной конвекции вносит значительные искажения в результаты полевых измерений, причем ошибки в определении скорости фильтрации в ряде случаев достигают I00 % и более.

2. Методику введения поправки по формуле (2) целесообразно использовать лишь при наличии одного фильтрующего интервала относительно небольшой (по сравнению с глубиной скважины) мощности.

3. При наличии многослойного фильтрующего разреза и при резкой дифференциации скоростей фильтрации по вертикали следует пользоваться либо результатами измерений в изолированных интервалах, либо комплексированием методов резистивиметрии и расходометрии.

ЛИТЕРАТУРА

Гринбаум И.И. Геофизические методы определения фильтрационных свойств горных
д. М., Недра, 1965. 188 с.

2. Матвеев Б.К. Геофизические методы изучения динамики подземных вод. М., Гостехиздат, 1963. 132 с.

3. Огильви Н.А., Федорович Д.И. Электролитический метод определения скорости
трации подземных вод и условия его практической применяемости. М., Недра, 1964. 44 с.