Записки Ленинградского горного института имени Г.В.Плеханова.
Т. 129. Л., 1991

УДК 556.332.4.04:556.34

В.Г.РУМЫНИН

О ПОГРЕШНОСТЯХ ИНДИКАТОРНЫХ ОПРОБОВАНИЙ ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТОВ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ РЕАЛЬНОЙ ТРЕХМЕРНОСТЬЮ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ

На точность интерпретации индикаторных опробований в рамках типовых расчетных моделей существенно влияет сочетание фильтрационной неоднородности пласта и естественного фильтрационного потока, приводящее к своеобразному физическому эффекту. Известно, что в разрезе водоносной толщи всегда присутствуют слои, зачастую ограниченные по простиранию, различающиеся между собой значениями проницаемости k. При этом разрез по нагнетательной скважине (рис.I, а) может быть однородным. Нагнетание индикаторной жидкости в такой пласт, когда ее растеканию в определенных направлениях препятствует естественный поток, приводит к внедрению природных вод в область, которая при планово двумерном рассмотрении миграционной задачи считается „водораздельной". Иными словами, реальная трехмерность процесса приводит к размыву границы раздела между нагнетаемой и пластовой (природной) водой даже в стационарном варианте, пренебрегающем гидродисперсионными эффектами: по каждой из зон потока (рис.I, б) может быть прослежена своя, нейтральная линия тока.

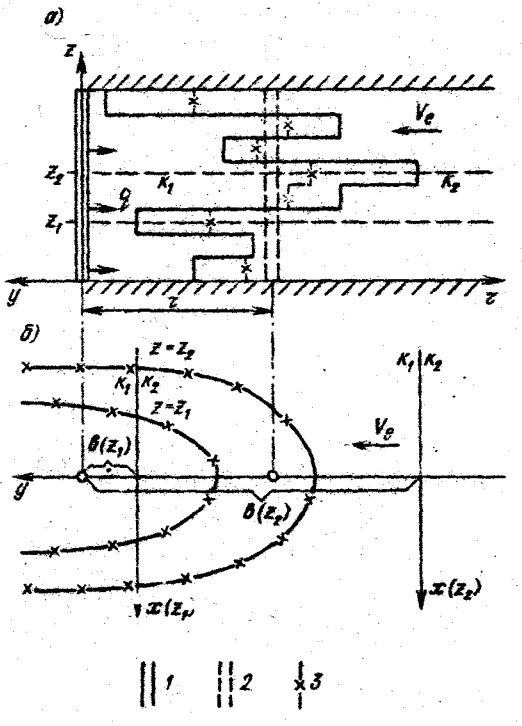


Рис.1. Особенности формирования границы раздела между индикаторной жидкостью и пластовой водой в неоднородном пласте при наличии естественного фильтрационного потока: а – схематическое представление профильного строения пласта, б – характерные зоны потока в отдельных слоях
1 – нагнетательная скважина; 2 – наблюдательная скважина; 3 – нейтральная линия тока

Теперь ясно, что если наблюдательная скважина

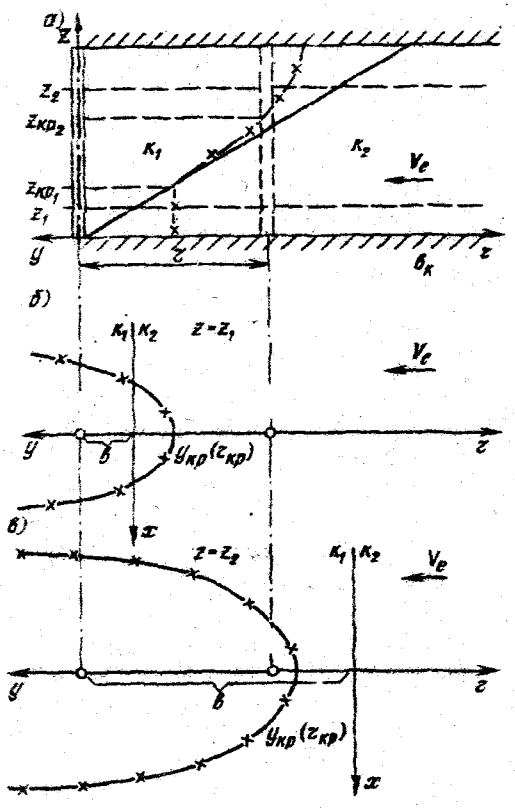


Рис.2. Упорядоченное представление слоистого пласта (а) и выделение расчетных элементов в двух его характерных сечениях $z = z_1$ (б), когда $C > b$, и $z = z_2$ (в), когда $C < B$

попадает в описанную область стационарного смешения, то предельная (при $t \to \infty$) концентрация индикатора в ней будет всегда ниже концентрации C_0 инъецируемого раствора на величину, которая контролируется гидродинамическими особенностями потоков, расстоянием между скважинами, а также степенью неоднородности пласта. Естественно, что последний фактор обусловливает дисперсию выходной концентрационной функции C в нестационарном режиме массопереноса. Перейдем теперь к теоретическому описанию процесса.

Для этого будем рассматривать его в квазитрехмерной постановке, полагая, что при нагнетании жидкости через скважину сохраняется условие послойного переноса индикатора (т.е. взаимодействием между слоями пренебрегаем). Элементарные слои расположим так, чтобы они образовывали клиновидную границу раздела между породами (рис.2), характеризующимися проницаемостью K_1 и K_2 ($K_1 > K_2$). Будем считать для упрощения математических зависимостей, что наблюдательные скважины расположены на центральной оси y, имеющей направление, совпадающее с направлением вектора скорости V_e (рис.2). Из решения фильтрационной задачи (оно было получено в свое время П.К.Конобеевским) для неоднородного слоя имеем следующее выражение для определения положения критической („водораздельной") точки $y_{кр}$ ($r_{кр}$):

$$y_{кр}(z) = b - C \qquad \text{или} \qquad r_{кр}(z) = C, \qquad (I)$$

если нейтральная линия тока захватывает область распространения менее проницаемых пород, т.е. когда выполняется условие

$$C = q(1 - \varkappa_{12})/2\pi V_e < b;$$

$$y_{кр}(z) = \frac{c'}{2}\left[\sqrt{(1+x_{12})^2 + 4b'(b'+x_{12}-1)} - (1+x_{12})\right]$$

или (2)

$$r_{кр}(z) = b - y_{кр}(z),$$

если нейтральная линия находится в области более проницаемых пород, т.е. когда $C < b$; здесь $x_{12} = (k_1 - k_2)/(k_1 + k_2)$, $C' = q/2\pi V_e$, $b = \alpha z$, $b' = b/C'$, $\alpha = b_k/m$ (рис.2,а); q - удельный (на единицу мощности m пласта) дебит нагнетания.

Зная теперь положение характерной точки $r_{кр}(z)$ и расстояние до наблюдательной скважины, можно оценить пропорции смешения воды в этой скважине, а также время регистрации $t_0(z)$ в ней индикатора, поступающего в нее по различным слоям с параметрами x_{12} и $b(z)$. В последнем случае используется кинематическое выражение:

$$t_0(z) = \int_0^r \frac{n\,dr}{V_y(r,z)}, \qquad (3)$$

где для зоны, в которой $k = k_1$,

$$V_y = \frac{q}{2\pi}\left[\frac{1}{r} - \frac{x_{12}}{2b-r}\right] - V_e; \qquad (4)$$

для зоны, где $k = k_2$,

$$V_y = \frac{q(1-x_{12})}{2\pi r} - V_e.$$

Во всех случаях $r < r_{кр}$.

Расчетные значения относительной концентрации $\bar{C}$ в наблюдательной скважине определяются по формуле смешения $\bar{C} = [m - z(t_0)]/m$ (в области $z_{кр_2} < z < m$). В принципе, аналогичным образом могут быть построены расчетные зависимости для оценки поведения концентрационной функции в любой точке пласта.

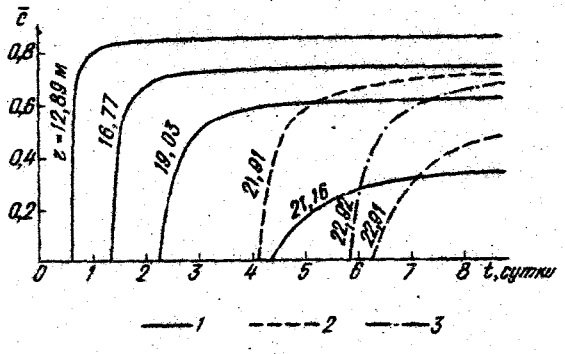


Рис.3. Характер расчетных кривых по наблюдательным скважинам, расположенным вверх по потоку от нагнетательной скважины
1, 2 и 3 - при x, равном соответственно 0,5; 0,1 и 0,05

На основе представленных зависимостей были построены выходные (теоретические) кривые (рис.3) для модельного индикаторного эксперимента в комплексах трещиноватых гомогенных пород ($n = 0{,}01$; $q = 15$ м^2/сутки; $m = 30$ м; $b_k = 90$ м; $V_e = 0{,}1$ м/сутки; $x_{12} = 0{,}05 \div 0{,}5$). Их анализ свидетельствует, что реальная неоднородность пород в сочетании с эффектом привноса „чистой"

воды естественным потоком в зону индикаторного воздействия приводит к резкому выполаживанию кривых на графиках $C(t)$ в сравнении со случаем идеального вытеснения. Естественно, что „подпор" купола растекания инъецированной воды бытовым потоком приводит к заметному замедлению фронта перемещения индикатора от центральной скважины по направлению к наблюдательной скважине.

Отмеченные особенности выходных кривых могут ошибочно трактоваться как проявление на них внутренней гетерогенности опробуемых пород: в данном случае двойной емкости (на уровне расчетной предпосылки неограниченной емкости)[x]. Соответствующая интерпретация дает завышение расчетной пористости и кинетического массообменного параметра.

---

[x] Мироненко В.А., Румынин В.Г. Опытно-миграционные работы в водоносных пластах. М.: Недра, 1986. 240 с.