

КОЛЬМАТАЖ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ СКВАЖИНЫ

Н. Н. Веригин

(*Москва*)

При откачке воды из скважин в их призабойной зоне под влиянием изменения давления происходит выпадение из воды и присоединение к грунту некоторых взвешенных и растворенных веществ (взвесей минеральных частиц, коллоидов гидроокиси железа, растворенных в воде карбонатов и т. д.). Это явление вызывает кольматаж призабойной зоны, уменьшение ее проницаемости и снижение дебита скважин.

Ниже дается постановка нелинейной краевой задачи о кольматаже призабойной зоны (§ 1) и приводится ее решение для жесткого (§ 2) и упругого (§ 3) режимов фильтрации.

§ 1. Исходные предпосылки и постановка задачи. Физико-химическая природа кольматажа призабойной зоны скважин весьма сложна, так как в этом явлении переплетаются происходящие в порах грунта процессы прилипания относительно крупных взвешенных частиц, коагуляции коллоидов и различные виды сорбции растворенных в воде солей. Однако кинетика этих процессов для простейших случаев описывается близкими уравнениями. Именно в уравнениях кинетики обычно принимается, что скорость процесса пропорциональна некоторой константе β и концентрации вещества в жидкой фазе C (или избытку насыщения $C - C_1$) в степени, зависящей от порядка процесса [1-3].

Для приближенного суммарного описания указанных процессов ниже принимается следующая рабочая гипотеза:

- а) скорость диффузии кольматирующих веществ по сравнению со скоростью фильтрации пренебрежимо мала;
- б) скорость выпадения этих веществ весьма велика ($\beta \rightarrow \infty$) и потому выпадение их из воды происходит мгновенно (сразу же, как они достигнут внешней границы зоны кольматажа).

Отсюда следует, что вне зоны кольматажа эти вещества перемещаются с естественной их концентрацией C_2 , всюду одинаковой и постоянной во времени (диффузия отсутствует). Как только кольматирующие вещества подходят к границе зоны кольматажа, они мгновенно выпадают на этой границе. Поэтому в зоне кольматажа концентрация этих веществ также всюду одинакова, постоянна во времени и равна равновесной концентрации C_1 ($C_1 < C_2$).

Накопление веществ, выпавших из воды в зоне кольматажа, будет равно предельной емкости поглощения грунта N_0 , соответствующей концентрации C_2 . В соответствии с этим зона кольматажа вблизи скважины радиусом $R(t)$ возрастает со временем t , что и вызывает уменьшение дебита скважины.

Кольматаж призабойной зоны происходит и при действии нагнетательных скважин. В отличие от эксплуатационных скважин, здесь из взвешенных и растворенных в нагнетаемой воде веществ образуется фильтрационная пленка на внутренней поверхности фильтра и ствола скважины.

Однако часть этих веществ, определяемая концентрацией C_1 , вместе с водой проходит через пленку и кольматаирует призабойную зону.

При указанных выше условиях концентрация C_1 в зоне кольматаажа, где уже достигнуто предельное насыщение грунта N_0 , остается всюду одинаковой и постоянной.

На выходе из зоны кольматаажа происходит быстрое выпадение кольматающего материала и концентрация его снижается до величины C_2 , которая вне зоны кольматаажа также остается всюду одинаковой и постоянной во времени ($C_1 > C_2$).

Ввиду этого кольматааж при откачках и нагнетаниях может быть описан одними и теми же уравнениями.

При принятых допущениях задача о кольматааже грунта вблизи скважины ставится следующим образом. Требуется найти функции $S_1(r, t)$ и $S_2(r, t)$, удовлетворяющие уравнениям

$$\frac{a_1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial S_1}{\partial r} \right) = \frac{\partial S_1}{\partial t} \quad (r_0 < r < R(t)) \quad (1.1)$$

$$\frac{a_2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial S_2}{\partial r} \right) = \frac{\partial S_2}{\partial t} \quad (R(t) < r < R_0) \quad (1.2)$$

при следующих условиях:

$$S_2(r, 0) = 0, \quad S_2(R_0, t) = 0 \quad (1.3)$$

$$-k_1 \frac{\partial S_1(r_0, t)}{\partial r} = \frac{Q_0(t)}{2\pi m r_0}, \quad \text{или} \quad S(r_0, t) = S_0(t) \quad (1.4)$$

$$S_1(R, t) = S_2(R, t), \quad k_1 \frac{\partial S_1(R, t)}{\partial r} = k_2 \frac{\partial S_2(R, t)}{\partial r} \quad (1.5)$$

$$[N_0 - n_0(C_2 - C_1)] \frac{dR}{dt} = \pm V(R)(C_2 - C_1) \quad (1.6)$$

$$V(R) = -k_1 \frac{\partial S_1(R, t)}{\partial r}$$

Здесь $S_{1,2}$ — понижение напора в точке с координатой r в момент времени t , $k_{1,2}$ — коэффициент фильтрации, $a_{1,2}$ — пропорциональность, $C_{1,2}$ — концентрации кольматающих веществ в воде (1 — в зоне кольматаажа и 2 — в пласте), N_0 — предельная емкость грунта (максимальное накопление веществ, кольматающих грунты, на единицу его объема), m — длина рабочей части скважины, равная мощности пласта, r_0 — радиус скважины, Q_0 и S_0 — дебит и понижение в скважине (при $r = r_0$), R — радиус зоны кольматаажа вблизи скважины, R_0 — радиус контура питания (в общем случае пласт может быть отличным от круга), n_0 — пористость грунта. Величины $k_{1,2}$, $a_{1,2}$, $C_{1,2}$, N_0 считаются постоянными.

В соотношениях (1.6) верхний знак принимается при откачках, а нижний — при нагнетаниях.

Кольматааж грунта можно рассматривать при жестком режиме фильтрации. Этот случай представляет интерес потому, что здесь можно получить простое решение для скважин в пластах различных форм с разными условиями на их границах, а также при разных условиях на скважине, т. е. при любом заданном законе изменения во времени дебита $Q_0(t)$ или понижения $S_0(t)$. При жестком режиме, ввиду кольматаажа призабойной зоны, фильтрация будет неустановившейся, и потому при любом $Q_0(t)$ или $S_0(t)$ величины $S(r)$ изменяются со временем.

Кольматааж грунта можно рассматривать и при упругом режиме фильтрации. В этом случае поставленная выше задача будет аналогична задаче о нагнетании жидкости в пласт, заполненный другой жидкостью [4]. Она имеет простое автомодельное решение лишь для скважины в неограниченном пласте при условии $Q_0(t) = \text{const}$.

2. Кольматаж призабойной зоны при жестком режиме фильтрации. В этом случае в уравнениях (1.1) — (1.2) $a_{1,2} \rightarrow \infty$; получим

$$S_1 = A_1 \ln r + B_1, \quad S_2 = A_2 \ln r + B_2 \quad (2.1)$$

где $A_{1,2}$ и $B_{1,2}$ — некоторые функции времени.

Используя условия (1.3) — (1.5), выразим их через $R(t)$ и подставим в (2.1); в результате будем иметь

$$S_1 = S_0 \frac{\sigma \ln \frac{R_0}{r} + (1 - \sigma) \ln \frac{R}{r}}{\sigma \ln \frac{R_0}{r_0} + (1 - \sigma) \ln \frac{R}{r_0}}, \quad S_2 = S_0 \frac{\sigma \ln \frac{R_0}{r}}{\sigma \ln \frac{R_0}{r_0} + (1 - \sigma) \ln \frac{R}{r_0}} \quad (2.2)$$

Отсюда скорость фильтрации $V(r, t)$ выразится так

$$V = -k_1 \frac{\partial S_1(r)}{\partial r} = \frac{k_1 S_0}{r \left[\sigma \ln \frac{R_0}{r_0} + (1 - \sigma) \ln \frac{R}{r_0} \right]} \quad \left(\sigma = \frac{k_1}{k_2} \right) \quad (2.3)$$

Для жесткого режима фильтрации при условиях на скважине первого и второго рода расход жидкости $Q(r, t)$ во всех сечениях потока одинаков и равен дебиту скважины $Q(r_0, t) = Q_0(t)$. Поэтому скорость фильтрации $V(r, t)$ можно выразить еще следующим образом

$$V = \frac{Q_0(t)}{2\pi m r} \quad (2.4)$$

Из (2.3) и (2.4) дебит скважины $Q_0(t)$ будет

$$Q_0 = \frac{2\pi m S_0 \sigma k_2}{\sigma \ln \frac{R_0}{r_0} + (1 - \sigma) \ln \frac{R}{r_0}} \quad (2.5)$$

Из (2.2) — (2.5) следует, что при $Q_0(t) = \text{const}$ расход потока в любом его сечении $Q(r)$ постоянен, скорость $V(r, t)$ по (2.4) не зависит от t , но зависит от r .

Понижение $S(r, t)$ согласно формулы (2.2) является функцией r, t , а величина понижения в скважине S_0 зависит от t и определяется из соотношения (2.5) при значении $Q_0 = \text{const}$.

При $S_0(t) = \text{const}$ расход потока в любом его сечении $Q(r)$ зависит только от t , скорость потока V согласно формулы (2.3) и понижение S согласно формулы (2.2) будут функциями r, t ; при этом дебит скважины Q_0 зависит от t в соответствии с уравнением (2.5) при $S_0 = \text{const}$.

Подставляя скорость фильтрации $V(R)$ согласно равенств (2.3) и (2.4) в соотношение (1.6), получим зависимость радиуса зоны кольматажа R от t для заданных $Q_0(t)$ и $S_0(t)$.

Ограничимся рассмотрением случаев $Q_0 = \text{const}$ и $S_0 = \text{const}$.

а) *Случай постоянного дебита скважины ($Q_0 = \text{const}$)*. Интегрирование уравнения (1.6) при значении V по (2.4) дает

$$R = \sqrt{\frac{Q_0 t}{\pi m \alpha} + r_0^2}, \quad \alpha = \pm \frac{N_0 - n_0 (C_2 - C_1)}{C_2 - C_1} \quad (2.6)$$

Здесь верхний знак принимается для откачек.

Понижение в скважине S_0 для $t \geq 0$ определяется из (2.4) при значениях V по (2.3), R по (2.6) и будет

$$S_0 = \frac{Q_0}{2\pi m k_2} \left[\ln \frac{R_0}{r_0} + \frac{(1-\sigma)}{2\sigma} \ln \left(1 + \frac{Q_0 t}{\pi \alpha m r_0^2} \right) \right] \quad (2.7)$$

Понижение, обусловленное кольматажем призабойной зоны, составит

$$\Delta = S_0 - |S_0|_{t=0} = \frac{Q}{2\pi m k_2} \zeta_k, \quad \zeta_k = \frac{1-\sigma}{2\sigma} \ln \left(1 + \frac{Q_0 t}{\pi \alpha m r_0^2} \right) \quad (2.8)$$

где ζ_k — сопротивление, обусловленное кольматажем, и k_2 — коэффициент фильтрации пласта в естественных условиях.

Относительный рост понижения, вызванный кольматажем, удобно оценивать равенством

$$\eta = \frac{|S_0|_{t=0}}{S_0} = 1 + \varphi, \quad \varphi = \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{\ln(R/r_0)}{\ln(R_0/r_0)} \quad (2.9)$$

Из (2.6) — (2.9) видно, что при $t \rightarrow \pi m \alpha (R_0^2 - r_0^2) / Q_0$ величины $R \rightarrow R_0$ и $\eta \rightarrow 1/\sigma$, т. е. в пределе понижение в скважине S_0 возрастает во столько же раз, во сколько уменьшается проницаемость пласта.

Допустим, что по данным эксплуатации скважины известны обусловленные кольматажем понижения Δ_1 и Δ_2 , соответствующие моментам времени t_1 и t_2 ($\Delta_2 > \Delta_1$; $t_2 > t_1$). Тогда будем иметь уравнения типа (2.8) с неизвестными σ и α . Исключая из них σ , получим

$$\zeta_2 \ln(1+s) = \zeta_1 \ln(1+st_2/t_1) \quad (2.10)$$

где

$$\zeta_1 = \frac{2\pi m k_2 \Delta_1}{Q_0}, \quad \zeta_2 = \frac{2\pi m k_2 \Delta_2}{Q_0}, \quad s = \frac{Q_0 t_1}{\pi m \alpha r_0^2} \quad (2.11)$$

Из (2.10) находится s , а затем из (2.11) определяется α . Зная α и σ , по (2.7) — (2.8) для любого времени t можно вычислить Δ и S_0 .

б) Случай постоянного понижения в скважине ($S_0 = \text{const}$). Интегрируя уравнение (1.6) при значении V по (2.3), будем иметь

$$t = 0.25 \frac{\alpha r_0^2}{k_2 \sigma S_0} F \left(\frac{R}{r_0}, \frac{R_0}{r_0}, \sigma \right) \quad (2.12)$$

$$F = 2 \left[\left(\frac{R}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \sigma \ln \frac{R_0}{r_0} + (1-\sigma) \left[2 \left(\frac{R}{r_0} \right)^2 \ln \frac{R}{r_0} - \left(\frac{R^2}{r_0^2} - 1 \right) \right] \quad (2.13)$$

Дебит скважины при любом t определяется из (2.5) при значении R по (2.12). Степень уменьшения дебита вследствие кольматажа будет

$$\eta = \frac{Q}{|Q_0|_{t=0}} = \frac{1}{1+\varphi} \quad (2.14)$$

где φ выражается по (2.9). При $R \rightarrow R_0$ величина $\eta \rightarrow \sigma$, а время t , соответствующее этому предельному случаю, находится из (2.12) при $R = R_0$.

Для оценки параметров σ и α по данным эксплуатации скважины следует найти радиусы зоны кольматажа $R = R_1, R_2$ при значениях $Q_0 = Q_1, Q_2$ и произвольных значениях σ , пользуясь уравнением (2.5), т. е.

$$\ln \frac{R_{1,2}}{r_0} = \left[\frac{2\pi m S_0 \sigma k_2}{(1-\sigma) Q_{1,2}} - \frac{\sigma}{1-\sigma} \ln \frac{R_0}{r_0} \right] \quad (2.15)$$

Затем из (2.12) при найденных R_1, R_2 и соответствующих им t_1, t_2 подсчитываются величины α_1 и α_2 . Искомые значения σ и α определяются точкой пересечения кривых $\alpha_1 = f(\sigma)$ и $\alpha_2 = f(\sigma)$. Для достаточной точности оценки α и σ такой расчет обычно требуется выполнить для трех произвольных значений σ .

3. Кольматаж призабойной зоны при упругом режиме фильтрации.
Рассмотрим скважину в неограниченном пласте ($R_0 = \infty$), действующую с постоянным дебитом $Q_0 = \text{const}$.

При этом несколько смягчим граничное условие на скважине (1.4), приняв

$$\left| r \frac{\partial S_1(r, t)}{\partial r} \right|_{r \rightarrow 0} = -\frac{Q_0}{2\pi m k_1} = \text{const} \quad (3.1)$$

Это условие означает, что постоянный дебит Q_0 принимается на оси скважины. Тогда можно найти автомодельное решение задачи, заменяя реальную скважину линейным источником постоянной интенсивности Q_0 .

В этом случае интегралы уравнений (1.1) и (1.2) будут

$$S_1 = A_1 \operatorname{Ei}\left(-\frac{r^2}{4a_1 t}\right) + B_1, \quad S_2 = A_2 \operatorname{Ei}\left(-\frac{r^2}{4a_2 t}\right) + B_2 \quad (3.2)$$

Находя из условий (1.3) — (1.5) постоянные $A_{1,2}, B_{1,2}$ и подставляя их в (3.2), получим

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{Q_0}{4\pi k_2 \sigma m} \left\{ -\operatorname{Ei}\left(\frac{r^2}{4a_1 t}\right) + \operatorname{Ei}\left(-\frac{\gamma}{4a_1}\right) - \sigma \exp\left[-\frac{\gamma}{4}\left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2}\right)\right] \operatorname{Ei}\left(-\frac{\gamma}{4a_2}\right) \right\} \\ S_2 &= -\frac{Q_0}{4\pi k_2 \sigma m} \exp\left[-\frac{\gamma}{4}\left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2}\right)\right] \operatorname{Ei}\left(-\frac{r^2}{4a_2 t}\right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Здесь γ — параметр, определяющий скорость продвижения фронта кольматажа призабойной зоны. Он находится из условия (1.6), которое приводит к трансцендентному уравнению

$$\gamma \exp \frac{\gamma}{4a_1} = \frac{Q_0}{\pi m \alpha} \quad (3.4)$$

Радиус зоны кольматажа будет

$$R = \sqrt{\gamma t} \quad (3.5)$$

Так как пьезопроводность α пропорциональна k , то можно принять $a_1 = \sigma a_2$, и тогда будет

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{Q_0}{4\pi m k_2 \sigma} \left\{ \operatorname{Ei}\left(-\frac{\gamma}{4a_2 \sigma}\right) - \sigma \exp\left[-\frac{\gamma(1-\sigma)}{4a_2 \sigma}\right] \operatorname{Ei}\left(-\frac{\gamma}{4a_2}\right) - \operatorname{Ei}\left(\frac{r^2}{4a_2 \sigma t}\right) \right\} \\ S_2 &= -\frac{Q_0}{4\pi m k_2} \exp\left[-\frac{\gamma(1-\sigma)}{4a_2 \sigma}\right] \operatorname{Ei}\left(-\frac{r^2}{4a_2 t}\right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Понижение в скважине S_0 определяется по формуле для S_1 при $r = r_0$, причем в связи с принятым выше смягчением граничного условия на скважине должно быть: $t \geq r_0^2 / \gamma$ (при $t = r_0^2 / \gamma$ граница зоны кольматажа совпадает со стенками скважины).

Отметим, что понижение на границе зоны кольматажа является постоянным и равным

$$S_k = -\frac{Q_0}{4\pi m k_2} \exp\left[-\frac{\gamma(1-\sigma)}{4a_2 \sigma}\right] \operatorname{Ei}\left(-\frac{\gamma}{4a_2}\right) \quad (3.7)$$

Расход на границе зоны кольматажа будет

$$Q_k = -2\pi m R k_1 \frac{\partial S_1(R, t)}{\partial r} = Q_0 \exp\left(-\frac{\gamma}{4a_1}\right) = \pi m \gamma \alpha \quad (3.8)$$

Если считать, что в зоне кольматажа имеет место жесткий режим, то $a_1 \rightarrow \infty$, тогда будет

$$S_1 = \frac{Q_0}{4\pi m \sigma k_2} \left[\ln \frac{\gamma t}{r^2} - \sigma e^{\frac{\gamma}{4a_2}} \operatorname{Ei}\left(-\frac{\gamma}{4a_2}\right) \right], \quad S_2 = -\frac{Q_0}{4\pi m k_2} e^{\frac{\gamma}{4a_2}} \operatorname{Ei}\left(-\frac{r^2}{4a_2 t}\right) \quad (3.9)$$

При $r^2 / 4a_2\sigma t \ll 0.09$ вблизи скважины, в зоне радиусом $r \ll 0.6\sqrt{a_2\sigma t}$, будет иметь место квазистационарный режим фильтрации, при котором пьезометрические кривые $S = f(r)$ аналогичны таковым при установившейся фильтрации. Тогда будет

$$\text{Ei}(-x) \approx -\ln \frac{0.562}{x}, \quad \gamma \approx \frac{Q}{\pi m \alpha} \quad (3.10)$$

$$S_1 \approx \frac{Q_0}{4\pi m k_2} \left[\left(\frac{1}{\sigma} - 1 \right) \ln \frac{Q_0 t}{\pi m a r^2} + \ln \frac{2.25 a_2 t}{r^2} \right]$$

$$S_2 \approx \frac{Q_0}{4\pi m k_2} \ln \frac{2.25 a_2 t}{r^2}, \quad S_k \approx \frac{Q_0}{4\pi m k_2} \ln \frac{2.25 \pi a m a_2}{Q_0} \quad (3.11)$$

Понижение в скважине S_0 находится по формуле для S_1 при $r = r_0$. Увеличение понижения в скважине вследствие кольматажа призабойной зоны будет

$$\Delta = S_0 - |S_0|_{t=0} = \frac{Q_0}{4\pi k_2 m} \zeta_k$$

$$\zeta_k = \left(\frac{1}{\sigma} - 1 \right) \ln \frac{\gamma t}{r_0^2} \approx \left(\frac{1}{\sigma} - 1 \right) \ln \frac{Q_0 t}{\pi m a r_0^2} \quad (3.12)$$

Допустим, что после устройства скважины проведена опытная откачка и найдены величины k_2 и a_2 . Пусть далее в моменты времени t_1 и t_2 после пуска скважины понижения в ней составили S_1 и S_2 . Тогда будем иметь два уравнения вида

$$S_{1,2} = \frac{Q_0}{4\pi m k_2} \left[\left(\frac{1}{\sigma} - 1 \right) \ln \frac{\gamma t_{1,2}}{r_0^2} + \ln \frac{2.25 a_2 t_{1,2}}{r_0^2} \right] \quad (3.13)$$

Решая их относительно σ и γ , получим

$$\sigma = \frac{\ln t_2 / t_1}{\zeta_2 - \zeta_1}, \quad \ln \frac{\gamma t_1}{r_0^2} = \frac{\sigma}{1 - \sigma} \left(\zeta_1 - \ln \frac{2.25 a_2 t_1}{r_0^2} \right) \quad (3.14)$$

где

$$\zeta_1 = \frac{4\pi k_2 m S_1}{Q_0}, \quad \zeta_2 = \frac{4\pi k_2 m S_2}{Q_0} \quad (3.15)$$

При известном γ из (3.10) находится α и далее по формуле (3.11) определяется понижение в скважине S_0 для любого времени $t > t_2$. Таким образом, для прогноза снижения динамического уровня в скважинах вследствие кольматажа достаточно знать понижения S_1 и S_2 для каких-либо двух моментов времени t_1 и t_2 .

Помимо этого, можно сразу находить σ , α , k и a из четырех уравнений типа (3.13) для моментов времени t_{1-4} .

Описанный здесь метод прогноза загрязнения призабойной зоны спрavedлив при условии: $\gamma / 4a_2\sigma \ll 0.09$, получающемся из сравнения точного решения (3.6) с приближенным (3.11).

Если это условие не соблюдается, то для оценки параметров σ и α следует пользоваться точным решением (3.6).

Если считать, что в зоне кольматажа имеет место жесткий режим, а вне этой зоны — упругий (уравнения (3.9)), то при $\gamma / 4a_2\sigma \ll 0.09$ получим такие же результаты, как и при упругом режиме в обеих зонах, т. е. уравнения (3.9) совпадают с уравнениями (3.11).

Сравним результаты исследования кольматажа при жестком и упругом режимах фильтрации для $Q_0 = \text{const}$. Из (2.6) и (3.5), (3.10) видно, что формулы для радиуса зоны кольматажа R в обоих случаях совпадают, если в (2.6) пренебречь малой величиной r_0^2 .

Из (2.7) и первого равенства (3.11) при $r = r_0$ следует, что понижение в скважине S_0 в обоих случаях будет одинаково, если в (2.7) принять радиус контура питания пласта R_0 равным

$$R = 1.5\sqrt{a_2 t} \quad (3.16)$$

и, кроме того, пренебречь в (2.7) единицей под знаком логарифма (что идентично отбрасыванию r^2 в уравнении (2.6) для R).

Отсюда следует, что с достаточной степенью точности можно принимать жесткий режим в обеих зонах, а радиус контура питания считать зависящим от времени по уравнению (3.16).

Определив из (3.14) — (3.15) α и σ , можно далее найти емкость поглощения грунта N_0 . Если отбирать пробы воды из эксплуатационной и наблюдательной скважины, расположенной вне зоны кольматажа, то можно определить концентрации кольматирующих взвешенных и растворенных веществ C_1 и C_2 , и тогда величина N_0 найдется из формулы (2.6). Если эти данные отсутствуют, то можно найти объем кольматирующего материала в порах грунта ζ_0 , пользуясь уравнением

$$\sigma = \frac{(n_0 - \zeta_0)^3 (1 - n_0)^2}{(1 - n_0 + \zeta_0)^2 n_0^3} \quad (3.17)$$

где n_0 — естественная пористость грунта.

Величина N_0 выразится так:

$$N_0 = \delta \zeta_0 \quad (3.18)$$

где δ — объемный вес осадка кольматирующих веществ в порах грунта.

Если коэффициент скорости выпадения кольматирующего материала $\beta \neq \infty$, то зона кольматажа будет отделена от естественного пласта некоторой зоной дисперсии, где концентрация кольматирующего материала в жидкой фазе с (r, t) изменяется от C_1 до C_2 , а накопление этого материала в твердой фазе $N(r, t)$ уменьшается от N_0 до 0. В этом случае исследование кольматажа требует совместного решения уравнений фильтрации типа (1.1) и уравнений движения взвешенных и растворенных веществ во всех трех зонах.

Для приближенного расчета в этом случае можно считать известной зависимость коэффициента фильтрации k или содержания осадка N от радиуса r в зоне дисперсии (в простейшем случае эта зависимость может быть принята линейной).

Тогда расчет кольматажа призабойной области можно выполнить, рассматривая три различные зоны при граничных условиях, аналогичных принятым выше.

Поступила 11 VI 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Шехтман Ю. М. Фильтрация малоконцентрированных суспензий. Изд. АН СССР, 1959.
2. Панченков Г. М., Лебедев В. Г. Химическая кинетика и катализ. Изд. МГУ, 1961.
3. Веригин Н. Н. Растворение и вымывание солей при фильтрации воды в грунтах. Сб. докл. на Конф. по раствор. и выщелачив. солей из горн. пород. Госстройиздат, 1959.
4. Веригин Н. Н. Нагнетание вязких растворов в горные породы. Изв. АН СССР, ОТН, 1952, № 5.