

ми, рекомендовать следующую приближенную формулу

$$P(r, \varphi, \tau) = P_{\infty} + P^{\circ} \quad (3.9)$$

Для теоретических исследований, для оценки приближенных решений, в которых обычно используется та или иная модификация метода смены стационарных состояний, можно рекомендовать пользоваться точным решением (3.4).

Поступило 14 III 1969

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Щелкачев В. Н. Разработка нефтеводоносных пластов в условиях упругого режима. М., Гостоптехиздат, 1959.
2. Чарный И. А. Основы подземной гидравлики. М., Гостоптехиздат, 1956.
3. Влюшин В. Е., Харин О. Н. Распределение давления в ограниченном пласте после пуска в эксплуатацию круговой галереи с переменным дебитом. Тр. Моск. нефт. ин-та, 1965, вып. 55.

### НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФИЛЬТРАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПРОМСТОКОВ В ПРИРОДНЫХ ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТАХ

Ф. М. БОЧЕВЕР, А. Е. ОРАДОВСКАЯ

(Москва)

Рассматривается задача о фильтрации загрязненных промышленных сточных вод, поступающих в природные водоносные горизонты из шламохранилищ, испарителей и других типов промышленных бассейнов.

Принимается, что водоносные горизонты в разрезе отделены от соседних водоносных пластов слабопроницаемыми глинистыми слоями. Учитывается при этом диффузия (фильтрационная дисперсия) и сорбция загрязнений как в основном фильтрующем пласте, так и в слабопроницаемых слоях подошвы и кровли.

Дается вывод дифференциальных уравнений (п. 1) и приводятся приближенные решения применительно к плоскопараллельной (п. 2) и радиальной (п. 3) схемам фильтрации. Показана существенная роль диффузионного отвода солей в слабопроницаемые слои кровли и подошвы (п. 4). Вследствие этого может происходить заметное «самоочищение» загрязненных вод.

1. Рассмотрим приближенное уравнение фильтрации солевых растворов, считая, что их концентрация может быть осреднена вдоль сечений, нормальных направлению потока. Это дает возможность свести уравнение к одномерному.

Весовой солевой поток  $Q$  [ $\kappa\text{г}/\text{м}^2\text{час}$ ] через элемент пласта при одномерной фильтрации [1, 2]

$$Q = -D \frac{\partial(\gamma C)}{\partial x} + \Delta v C \quad (1.1)$$

где  $C$  — весовая концентрация компонента в растворе [ $\kappa\text{г}/\kappa\text{г}$ ],  $v$  — скорость фильтрации [ $\text{м}/\text{час}$ ],  $\gamma$  — удельный вес раствора [ $\kappa\text{г}/\text{м}^3$ ],  $D$  — коэффициент фильтрационной дисперсии [ $\text{м}^2/\text{час}$ ].

Уравнение неразрывности солевого потока можно записать в виде

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = - \frac{\partial(n\gamma C)}{\partial t} + W \quad (1.2)$$

где  $n$  — пористость пласта, а  $W$  — суммарные потери солей из раствора вследствие сорбции, заполнения так называемых «тупиковых» пор, выпадения компонента в осадок и удаления солей в породы кровли и подошвы пласта.

Решая совместно (1.1) и (1.2) с учетом уравнения баланса для воды

$$\frac{\partial(\gamma v)}{\partial x} + \frac{\gamma(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{m} = - \frac{\partial(n\gamma)}{\partial t}$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  — скорости перетекания воды через подошву и кровлю пласта,  $m$  — его мощность, получаем

$$D \frac{\partial^2 C'}{\partial x^2} - v \frac{\partial C'}{\partial x} - \frac{C'(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{m} = n \frac{\partial C'}{\partial t} + W \quad (1.3)$$

Для осесимметричного плоскорадиального потока аналогично выводится следующее уравнение:

$$\frac{D}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial C'}{\partial r} \right) - v \frac{\partial C'}{\partial r} - \frac{C'(e_1 - e_2)}{m} = n \frac{\partial C'}{\partial t} + W \quad (1.4)$$

Здесь  $C' = \gamma C$  — объемная концентрация компонента [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ]. В дальнейшем для простоты записи штрих при  $C$  опускается.

В (1.3) и (1.4) за малостью отброшены члены, содержащие производные от удельного веса по пути фильтрации.

Раскроем теперь выражение для  $W$

$$W = n \frac{\partial N}{\partial t} + n \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{D_1}{m} \frac{\partial C_1}{\partial z} \Big|_{z_1} - \frac{D_2}{m} \frac{\partial C_2}{\partial z} \Big|_{z_2} - \frac{e_1}{m} C_1 \Big|_{z_1} + \frac{e_2}{m} C_2 \Big|_{z_2} \quad (1.5)$$

Здесь  $N$  и  $M$  — количество солей, соответственно сорбированных на твердой фазе и задержанных в «тупиковых» порах,  $C_1$  и  $C_2$  — концентрации компонента в поровых растворах подошвы и кровли,  $D_1$  и  $D_2$  — коэффициенты диффузии последних.

Механизм солеотдачи в тупиковые поры [3, 4] можно охарактеризовать таким же уравнением, что и для кинетики сорбции, т. е. оба процесса описать уравнением следующего вида:

$$\frac{\partial(N + M)}{\partial t} = \alpha [C - \beta(N + M)] \quad (1.6)$$

Здесь  $\alpha$  и  $\beta$  — некоторые обобщенные параметры сорбции и солеотдачи в тупиковые поры, определяемые опытным путем.

Решая уравнение (1.6) как обыкновенное линейное уравнение, получаем

$$\frac{\partial(N + M)}{\partial t} = \alpha \int_0^t \frac{\partial C}{\partial t} e^{-\alpha\beta(t-\tau)} d\tau \quad (1.7)$$

Из этого следует, что если рассматривать уравнения (1.3), (1.4) и (1.5) без учета перетока солей в кровлю и подошву (в правой части уравнения (1.5) при этом сохраняется только один член, представленный произведением пористости на интеграл (1.7)), то весь процесс изменения соледержания в фильтрующем пласте во времени как бы разделяется на две части: в одной из них пористость постоянная, а в другой изменяется по закону экспоненты. Пористость в данном случае, учитывая роль тупиковых пор, затрудняющих водо- и солеобмен, а также различия в доступности отдельных участков породы для сорбции, можно трактовать как «показатель соленасыщения» фильтрующего пласта.

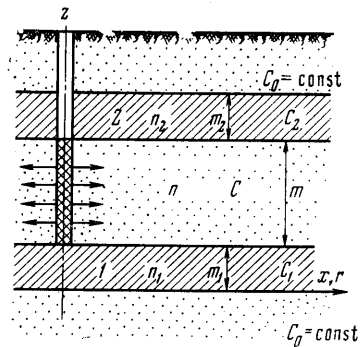
Оба указанных фактора (сорбция и тупиковые поры) приводят к замедлению и растягиванию процесса формирования результирующей концентрации подземных вод при фильтрации загрязненных растворов. Но численно концентрация в пласте в конечном счете достигает таких же величин, как и при отсутствии сорбции и солеотдачи в тупиковые поры. Это сходно с фильтрацией в породах с «двойной пористостью», а также в слоистых водоносных толщах [5, 6].

Уменьшение концентрации фильтрующихся растворов, и следовательно, эффект их самоочищения достигается в основном за счет оттока солей в подошву и кровлю пласта.

Для решения уравнений (1.3), (1.4) и (1.5) с учетом солеотдачи в подошву и кровлю необходимо предварительно найти значения  $C_1$  и  $C_2$  из решения уравнений миграции солей для слоев подошвы и кровли при соответствующих условиях на границах этих слоев.

Ниже приводятся результаты рассмотрения таких задач для плоскопараллельного и осесимметричного случаев.

2. Допустим, что через линейную систему скважин (галерею) в пласт (фиг. 1) нагнетаются сточные воды при концентрации загрязняющего компонента  $C_+$ . Пласт отделен от ниже- и вышележащих пластов, в которых напоры и концентрации постоянны, слабопроницаемыми («раздельными») глинистыми слоями 1, 2 соответственно подошвы и кровли. Будем считать, что фильтрация через эти раздельные слои происходит только в вертикальном направлении и со столь малой скоростью, что миграция солей в них осуществляется преимущественно под влиянием диффузии.



Фиг. 1

Уравнения для отдельных слоев имеют вид

$$D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} = n_i \left( \frac{\partial C_i}{\partial t} + \alpha_i \int_0^t \frac{\partial C_i}{\partial t} e^{-\alpha_i \beta_i (t-\tau)} d\tau \right) \quad (i = 1, 2) \quad (2.1)$$

Второй член в правой части уравнений (2.1) вводится по аналогии с основным фильтрующим пластом и характеризует обобщенный сорбционный эффект по уравнению кинетики вида (1.6), (1.7) ( $\alpha_i$  и  $\beta_i$  — параметры этих уравнений).

Уравнения (2.1) должны решаться при следующих условиях:

$$t = 0, \quad C_i = C^0 \quad (2.2)$$

$$t > 0, \quad z = m_1, \quad z = m_1 + m, \quad C_1 = C_2 = C \quad (2.3)$$

$$z = 0, \quad z = m_1 + m + m_2, \quad C_1 = C_2 = C_0 = \text{const}$$

Применяя преобразование Лапласа

$$T_i = \int_0^\infty (C_i - C^0) e^{-p t} dt$$

вместо (2.1) получаем систему обыкновенных уравнений, решение которых при трансформированных условиях (2.2) и (2.3) будет

$$T_1 = T \frac{\text{sh}(z\gamma_1)}{\text{sh}(m_1\gamma_1)}, \quad T_2 = T \frac{\text{sh}[(m_1 + m + m_2 - z)\gamma_2]}{\text{sh}(m_2\gamma_2)} \quad (2.4)$$

где  $T$  — преобразованная по Лапласу функция концентрации в основном фильтрующем слое

$$\gamma_i = \left[ \frac{p}{D_i^*} \left( 1 + \frac{\alpha_i}{p + \alpha_i \beta_i} \right) \right]^{1/2} \quad \left( D_i^* = \frac{D_i}{n_i} \right) \quad (2.5)$$

Исходные уравнения (1.3) и (1.5) с учетом условий (2.3) в форме изображений запишутся так:

$$T'' - \frac{V^*}{D^*} T' - \gamma^2 T - \frac{D_1}{Dm} T_1' |_{z=m_1} + \frac{D_2}{Dm} T_2' |_{z=m_1+m} \quad (2.6)$$

Здесь

$$\gamma = \left[ \frac{p}{D^*} \left( 1 + \frac{\alpha}{p + \alpha \beta} \right) \right]^{1/2}, \quad D^* = \frac{D}{n}, \quad V^* = \frac{V}{n} \quad (2.7)$$

После определения из (2.4) производных  $T_1'$  и  $T_2'$  и подстановки в (2.6) получим

$$T'' - \frac{V^*}{D^*} T' - \kappa^2 T = 0 \quad (2.8)$$

где

$$\kappa = \left[ \gamma^2 + \frac{D_1 \gamma_1}{mD} \text{cth}(m_1 \gamma_1) + \frac{D_2 \gamma_2}{mD} \text{cth}(m_2 \gamma_2) \right]^{1/2} \quad (2.9)$$

Решение (2.8) при условиях

$$t > 0, \quad x = 0, \quad T = \frac{C_+ - C^0}{p}, \quad x = \infty, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (2.10)$$

( $C^0$  — начальная (фооновая) концентрация подземных вод) будет иметь вид

$$T = \frac{C_+ - C^0}{p} \exp \left\{ x \left[ \frac{V^*}{2D^*} - \left( \left( \frac{V^*}{2D^*} \right)^2 + \kappa^2 \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (2.11)$$

При длительных периодах времени можно положить

$$p \leq 0.1 \alpha_i \beta_i \quad (\text{порядка } t \geq 10/\alpha_i \beta_i), \quad \gamma_i^2 \approx \frac{p}{D_i^*} \left( \frac{1 + \beta_i}{\beta_i} \right)$$

Тогда, учитывая, что при малых значениях аргумента

$$m_i \gamma_i \text{cth}(m_i \gamma_i) \approx 1 + \frac{m_i^2 p (1 + \beta_i)}{3 \beta_i D_i^*}$$

вместо (2.9) получаем

$$\kappa \approx \left[ \frac{A}{D^*} \left( p + \frac{E}{A} \right) \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

где

$$A = \frac{1 + \beta}{\beta} + \frac{n_1 m_1}{3nm} \left( \frac{1 + \beta_1}{\beta_1} \right) + \frac{n_2 m_2}{3nm} \left( \frac{1 + \beta_2}{\beta_2} \right) \quad (2.13)$$

$$E = \frac{D_1}{nm_1 m} + \frac{D_2}{nm_2 m}$$

При этом переход от изображения (2.11) к оригиналу осуществляется по табличным соотношениям. В результате имеем

$$C = C^0 + (C_+ - C^0)R \quad (2.14)$$

$$R = \frac{1}{2} \left[ \exp \left( \frac{P}{2} (1 - \xi) \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{1 - P(F_0/A)\xi}{2(F_0/A)^{1/2}} \right) + \exp \left( \frac{P}{2} (1 + \xi) \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{1 + P(F_0/A)\xi}{2(F_0/A)^{1/2}} \right) \right] \quad (2.15)$$

$$\left( P = \frac{V^* x}{D^*}, \quad F_0 = \frac{D^* t}{x^2}, \quad \xi = (1 + B)^{1/2}, \quad B = \frac{4ED^*}{V^{*2}} \right)$$

Скорость фильтрации  $V$  здесь находится из соответствующего решения гидродинамической задачи о нагнетании жидкости в систему скважин с постоянным дебитом

$$V = q_0 / 2m \quad (\text{при } t > (5 \div 10)x^2 / a)$$

Здесь  $q_0$  — двусторонний погонный расход галереи,  $a$  — коэффициент пьезопроводности.

Из (2.14) и (2.15) видно, что процесс миграции солей со временем стабилизируется и при длительной фильтрации, когда  $t = \infty$

$$C = C^0 + (C_+ - C^0) \exp [1/2 P (1 - \xi)] \quad (2.16)$$

3. Рассматривается фильтрация загрязненных вод через скважину или из бассейна круглой формы радиуса  $r_0$  в слоистую толщу. В разрезе схема сохраняется прежней (фиг. 1). Исходные уравнения для основного слоя будут иметь вид (1.3) и (1.5), в которых при постоянном расходе инъецируемых вод  $Q_0 = \text{const}$  скорость фильтрации в условиях квазистационарного режима выразится следующим образом:

$$V = Q_0 / 2\pi m r \quad (3.1)$$

Выражения для  $W$  определяются, как и для плоскопараллельной схемы. Принимая обобщенное уравнение (1.7) для сорбции и солеотдачи в тупиковые поры, а также уравнения (2.1), характеризующие миграцию солей в кровлю и подошву, после перехода к трансформированным функциям по Лапласу получаем

$$T'' + \frac{1}{r} (1 - 2\nu) T' - \gamma^2 T - \frac{D_1}{Dm} T_1' |_{z=m_1} + \frac{D_2}{Dm} T_2' |_{z=m_1+m} = 0 \quad (3.2)$$

$$(\nu = Q_0 / 4\pi m n D^*)$$

После подстановки производных  $T_1'$  и  $T_2'$  в уравнение (3.2) получим

$$T'' + \frac{1}{r} (1 - 2\nu) T' - \kappa^2 T = 0 \quad (3.3)$$

где  $\kappa$  определяется по (2.9). Решение уравнения (3.3) при условии  $C = C_+ = \text{const}$  при  $r = r_0$  выражается так [8, 9]:

$$T = (C_+ - C^0) (r / r_0)^\nu K_\nu(r\kappa) / p K_\nu(r_0\kappa) \quad (3.4)$$

где  $K_\nu$  — символ функции Бесселя второго рода от мнимого аргумента  $\nu$ -го порядка. Получим, как и ранее, приближенное решение, пригодное для длительных периодов фильтрации, т. е. при  $\kappa$ , выраженном по (2.12) и (2.13). Полагая, что  $r_0$  мало,

и учитывая, что при этом  $K_v(z) \approx \frac{1}{2}\Gamma(v) (2/z)^v$ , можно уравнение (3.4) выразить в виде

$$T = \frac{(C_+ - C^0)r^v\eta^v}{2^{v-1}p\Gamma(v)} K_v(r\eta), \quad \eta = \left( \frac{A}{D^*} \left( p + \frac{E}{A} \right) \right)^{1/2} \quad (3.5)$$

После перехода от изображений к оригиналу получим

$$C = C^0 + (C_+ - C^0)R \quad (3.6)$$

$$R = \frac{1}{\Gamma(v)} \int_{A/4F_0}^{\infty} e^{-z-B/z} z^{v-1} dz \quad \left( F_0 = \frac{D^*t}{r^2}, B = \frac{Er^2}{4D^*} \right) \quad (3.7)$$

Интеграл (3.7) подробно нами табулирован.

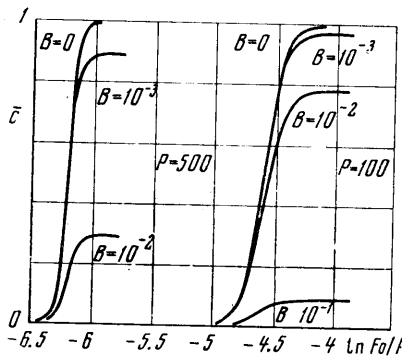
Здесь, следовательно, процесс миграции со временем также приобретает установившийся характер. При длительной фильтрации, когда можно положить  $t = \infty$ , из (3.7) получим

$$C = C^0 + (C_+ - C^0) \frac{r^v (E/D^*)^{1/2} v}{2^{v-1} \Gamma(v)} K_v(r(E/D^*)^{1/2}) \quad (3.8)$$

4. Из приведенных решений следует, что при диффузионном оттоке в породы подошвы и кровли и накоплении в них солей под влиянием сорбции достигается существенное снижение концентрации фильтрующихся по основному пласту загрязненных вод, т. е. их самоочищение.

На фиг. 2 приведены кривые  $C = (C - C^0) / (C_+ - C^0)$  в зависимости от  $A, B, P$  и  $F_0$  для плоскопараллельного потока, показывающие, что при  $B \geq 10^{-2}$  концентрация загрязнений может уже через короткое время составить только малую долю от первоначальной их концентрации на входе. При этом чем более интенсивен конвективный перенос солей, т. е. чем больше величина  $P$ , тем быстрее устанавливается некоторая постоянная концентрация загрязнений.

При практических расчетах, как правило, можно, по-видимому, пренебречь дисперсией, поскольку в хорошо проницаемых пластах преобладает конвективный перенос солей. В этом случае решение уравнений (1.4) и (1.5) при принятых временных ограничениях будет иметь вид



Фиг. 2

$$C = C^0 + (C_+ - C^0) \exp\left(-\frac{Ex}{V^*}\right) f(t - \lambda) \quad (4.1)$$

$$\left( \lambda = \frac{Ax}{V^*} \right)$$

Здесь  $A$  и  $E$  определяются по (2.13); символом  $f$  обозначается единичная функция:  $f = 0$  при  $t < \lambda$  и  $f = 1$  при  $t > \lambda$ .

Координата  $x$  границы раздела между загрязненными водами и подземными водами с фоновой концентрацией при этом будет

$$x = \frac{V^*t}{A} \quad (4.2)$$

Оценим солеотдачу  $S$  из основного фильтрующего слоя в породы подошвы и кровли, воспользовавшись для этого очевидным балансовым соотношением

$$S = \frac{1}{2} q_0 C_+ t - m n \int_0^{x(t)} (C - C^0) dx \quad (4.3)$$

где  $x(t)$  — координата границы раздела, определяемая при пренебрежении дисперсией в основном фильтрующем слое, по (4.2). Подставляя в (4.3) выражение  $C - C^0$  из

(4.1) и интегрируя, получаем

$$S = {}^1/2 q_0 C_+ t \left[ 1 - \frac{1 - C_0/C_+}{Et} \left( 1 - \exp \left( - \frac{Et}{A} \right) \right) \right] \quad (4.4)$$

Таким образом, при принятом условии постоянства концентрации  $C_0$  в соседних пластах солеотдача с течением времени возрастает и в пределе становится равной объему солей, инъецируемых в пласт.

Однако и в том случае, когда соседние слои являются вовсе «закрытыми», солеотдача только в отдельные глинистые слои подошвы и кровли может быть также ощутимой, поскольку диффузия и сорбция в них происходит на больших площадях.

С этой точки зрения представляет интерес решение для схемы с «бесконечной» мощностью раздельных слоев. При этом в выражениях (2.8), (2.9)  $\text{cth}(m_i \gamma_i) = 1$  и для длительных периодов времени получим

$$\kappa \approx [(1 + \beta)\beta^{-1}p + B^*p^{1/2}]^{1/2} \quad (4.5)$$

где

$$B^* = \frac{1}{nm} (n_1 [D_1^* (1 + \beta_1) \beta_1^{-1}]^{1/2} + n_2 [D_2^* (1 + \beta_2) \beta_2^{-1}]^{1/2}) \quad (4.6)$$

С учетом (4.5) вместо решения (2.11) при  $D^* = 0$  будем иметь

$$T = \frac{C_+ - C_0}{p} \exp \left( - \frac{x}{V^*} ((1 + \beta)\beta^{-1}p + B^*p^{1/2}) \right) \quad (4.7)$$

И после перехода от изображений к оригиналу

$$C = C_0 + (C_+ - C_0) \text{erfc} \left( \frac{B^*x}{2V^*(t - \lambda)^{1/2}} \right) f(t - \lambda) \quad (4.8)$$

Здесь, по-прежнему,  $f$  — единичная функция, причем  $\lambda = (1 + \beta)\beta^{-1}x / V^*$ .

Координата границы раздела загрязненных стоков и естественных вод в данном случае определяется также по (4.2) при  $A = (1 + \beta)\beta^{-1}$ .

Решения (4.1) и (4.8) и формула (4.2) будут справедливыми также для радиального потока, если в них положить  $x = r^2 - r_0^2$  и  $V^* = Q_0 / \pi m$ .

Решение (4.8), помимо ранее принятых ограничений, должно удовлетворять также следующим соотношениям, вытекающим из предпосылки о «бесконечной» мощности глинистых слоев подошвы и кровли

$$t \leq \frac{m_i^2 (1 + \beta_i)}{2D_i \beta_i} \quad (4.9)$$

Критерии (4.9) являются более общими и в соответствии с реальными значениями входящих в них параметров позволяют широко пользоваться формулой (4.8) для практических расчетов.

Поскольку в рассматриваемых условиях всегда  $z = B^*x / 2V^*(t - \lambda)^{1/2} > 0$  и, следовательно,  $\text{erfc}(z) < 1$ , то теоретически в течение всего периода фильтрации по (4.8)  $C < C_+$ . Только при  $t = \infty$ , когда  $\text{erfc}(z) = 1$ ,  $C = C_+$ .

Таким образом, и при отсутствии соседних слоев с постоянной концентрацией  $C_0$  диффузия и сорбция в слабопроницаемых глинистых породах подошвы и кровли, а также процессы сорбции в основном фильтрующем пласте задерживают распространение загрязнений, вызывая более позднее появление входной концентрации. При этом, как следует из приведенных выражений, при длительной фильтрации кинетику сорбции практически можно не учитывать и сам процесс сорбции считать равновесным.

Фронт сорбционно-дисперсионной волны, т. е. точка с половинной концентрацией в условиях солеотдачи в породе подошвы и кровли и сорбции в основном пласте отстает от фронта фильтрации (или «фронта поршневого вытеснения»).

В линейном потоке при постоянной скорости фильтрации это смещение сохраняется неизменным, а в радиальном потоке отставание сорбционно-дисперсионного фронта с течением времени возрастает.

Отметим, что математическое описание процесса миграции солей весьма сходно с задачами теплопереноса в потоках подземных вод. В частности, при рассмотрении таких задач авторами и Н. Н. Лапшиным в институте ВОДГЕО получены выражения (2.15), (3.7) и (4.1). Формула (4.8) при  $D_1 = D_2$  и  $\beta_1 = \beta_2 = \infty$  совпадает с формулой Ловерье [9] экспериментально подкрепленной Г. Е. Малофеевым [10].

Поступило 17 IV 1969

## ЛИТЕРАТУРА

1. Веригин Н. Н. Некоторые вопросы химической гидродинамики, представляющие интерес для мелиорации и гидротехники. Изв. АН СССР, ОТН, 1953, № 10.
2. Шестаков В. М. К теории фильтрации растворов в грунтах. В сб.: «Вопросы формирования химического состава подземных вод». М., Изд-во МГУ, 1963.
3. Левич В. Г., Письмен Л. М., Кучанов С. И. О гидродинамическом перемешивании в зернистом слое. Физическая модель застойных зон. Докл. АН СССР, 1966, т. 168, № 2.
4. Дворкин Л. Б. К теории конвективной диффузии солей в пористых средах. Ж. физ. хим., 1968, т. 42, № 4.
5. Баренблатт Г. И., Желтов Ю. П., Кочина И. Н. Об основных представлениях теории фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах. ПИММ, 1960, т. 24, вып. 5.
6. Boulton N. Analysis of data from non equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage. Proc. Inst. Civil. Engrs., 1963, vol. 26, pp. 469—482.
7. Бочевер Ф. М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. М., «Недра», 1968.
8. Бочевер Ф. М., Орадовская А. Е. Конвективная диффузия солей в радиальном потоке подземных вод в связи с защитой их от загрязненных стоков. Тр. ин-та ВОДГЕО, вып. 13, 1966.
9. Louwerier H. A. The transport of heat in an oil layer caused by the injection of hot fluid. Appl. Sci. Res., 1955, vol. 5, No. 2, 3.
10. Малофеев Г. Е. Сравнительная оценка формул расчета нагревания пласта при нагнетании горячей жидкости. Нефт. хоз-во, 1962, № 4.

## ФИЛЬТРАЦИЯ АСФАЛЬТЕНО-СМОЛИСТЫХ НЕФТЕЙ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

А. Т. ГОРБУНОВ, Н. А. ЕФРЕМОВА, Я. ХОРНЕШ

(Москва, Будапешт)

На основе лабораторных исследований [1] устанавливается зависимость коэффициента подвижности асфальтено-смолистых нефтей от градиента давления. Указывается на необходимость учета этой зависимости в гидродинамических расчетах по определению дебитов нефтяных скважин. Показано, что если для таких нефтей считать коэффициент подвижности не зависящим от градиента давления, то при этом можно допустить существенные ошибки при проведении необходимых расчетов.

Для исследования кажущейся вязкости асфальтено-смолистых нефтей была сконструирована специальная установка, которая позволяла осуществлять течение нефти при заданном перепаде давления в пределах от 0.07 до 20 ат и заданной температуре в пределах от 96 до 105°С. В качестве модели жидкости использовалась нефть с содержанием асфальтенов от 19.0 до 20.0% и смолистых соединений от 23.4 до 41.0%. Опыты проводились на круглых капиллярах диаметром от 0.07 до 0.3 мм, длиной 100 мм, плоских щелях разной раскрытости длиной 100 мм и естественных образцах пористых пород.

Результаты опытов, обработанные по формулам Гагена — Пуазейля и Дарси, показали существенную зависимость кажущейся вязкости нефти от градиента давления. Результаты эти приведены на фиг. 1 и 2. Зависимость вязкости  $\mu$ , *спз* асфальтено-смолистых нефтей от градиента давления  $y = dp/dx$  ат/см на капиллярах разного диаметра представлена на фиг. 1, где точкам 1, 2, 3, 4, 5, 6 соответствуют значения радиуса капилляра  $r = 0.182, 0.118, 0.109, 0.071, 0.038, 0.037$  мм,  $p$  — давление,  $x$  — расстояние. Зависимость кажущейся вязкости асфальтено-смолистых нефтей от градиента давления на естественных пористых средах представлена на фиг. 2, где точкам 1 соответствует первый образец, длина  $l = 4.4$  см, диаметр  $d = 2.1$  см, константы жидкости  $a = 4.6$ ,  $b = 2.3$  см/ат; 2 — второй образец,  $l = 4.0$  см,  $d = 2.1$  см,  $a = 5.4$ ,  $b = 2$  см/ат.

Оказалось, что чем больше диаметр капилляра или ширина щели, тем меньше величина кажущейся вязкости зависит от градиента давления. На всех опытах с увеличением градиента давления значение кажущейся вязкости уменьшалось и стремилось к постоянному ее значению.

Когда из проб нефтей были удалены асфальтены и смолистые соединения, значение вязкости в опытах на тех же капиллярах, щелях и естественных образцах оказалось равным постоянной величине. Зависимость кажущейся вязкости безасфаль-