

ТЕХНИКА ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

УДК 622.277

Н. А. ПУЧКОВ

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ВЫЩЕЛАЧИВАЮЩИХ РАСТВОРОВ ПРИ НАСЫЩЕНИИ ПОРИСТЫХ СРЕД ПЛОХО ПРОНИЦАЕМЫХ ПОРОД С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ АНИЗОТРОПИИ

Предложена схема движения выщелачивающих растворов, учитывающая как особенности взаимодействия порово-струйных потоков при насыщении ими пористых сред горных пород, так и фильтрационную анизотропию последних. Применительно к системе порово-струйных потоков проведен теоретический анализ основных уравнений движения растворов, базирующийся на постоянстве количества движения и массового расхода в любом сечении порово-струйных потоков. В результате обоснованы закономерности изменения времени и скорости движения растворов при насыщении ими пористых сред, представленные в виде математических формул.

Скорость, время и глубина проникновения растворов в плохо проницаемые породы с различными степенями фильтрационной анизотропии и закономерности движения растворов в соответствующих пористых средах во многом определяют кинетику и эффективность подземного, отвального и кучного выщелачивания.

При обосновании закономерностей движения растворов применительно к насыщению ими дробленых кусков, слоев, линз или прослоев плохо проницаемых рудоносных пород исходили из того, что в зависимости от степени фильтрационной анизотропии последних движение жидкости в их пористых средах происходит в виде порово-струйных потоков, имеющих в поперечном сечении круглую, уплощенную или плоскую, а в объеме соответственно конусообразную или трапециевидную формы, образующиеся от самой поверхности насыщаемой пористой среды (рис. 1). Из рис. 1 следует, что с увеличением глубины ( $l$ ) насыщения пористой среды площади и соответственно объемы активных зон 1, в пределах которых происходит поступательное движение жидкости, уменьшаются, а площади и объемы пассивных зон 2, где поступательное движение жидкости отсутствует, возрастают и достигают максимума при полном насыщении у пород с пористой средой. Поэтому количество порово-струйных потоков в начальном сечении пористой

среды с увеличением глубины ( $l$ ) стремиться к нулю. При обосновании структуры потоков исходили из того, что с соотношениями коэффициентов фильтрации  $K_{\phi z} = K_{\phi y} \leq K_{\phi x}$  или  $K_{\phi z} = K_{\phi y} \geq K_{\phi x}$  порово-струйные потоки будут иметь, в поперечном сечении относительно оси круглую форму. Если же для пород  $K_{\phi z} \ll K_{\phi y} \leq K_{\phi x}$ , то у потоков в поперечном сечении относительно оси (направление поступательного движения растворов) будет преобладать уплощенная или плоская форма. При определенной фильтрационной анизотропии пород насыщение их пористой среды растворами может одновременно осуществляться порово-струйными потоками, имеющими в поперечном сечении плоскую, уплощенную или круглую формы.

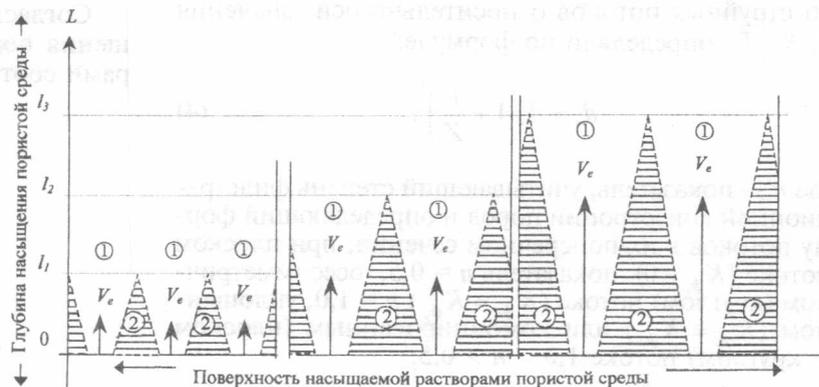


Рис. 1. Изменения объемов и площадей активных (1) и пассивных (2) зон жидкости в пористой среде в зависимости от глубины ее насыщения ( $l$ ) порово-струйными потоками выщелачивающих растворов

Для схемы движения выщелачивающих растворов (рис. 1) проведен теоретический анализ уравнений, учитывающих:

1) постоянство количества движения массы растворов в единицу времени в любом сечении поро-струйных потоков:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\rho_n}{\mu_n} Q_n V_n &= \frac{\rho_e}{\mu_e} Q_e V_e \\ \text{или} \\ \left( \frac{\rho_n}{\mu_n} \right)^{0,5} V_n (\sqrt{F_n} = d_n^{k_1-1,0}) &= \left( \frac{\rho_e}{\mu_e} \right)^{0,5} V_e (\sqrt{F_e} = d_e^{k_1-1,0}) \end{aligned} \right\}; \quad (1)$$

2) постоянство массового расхода растворов в единицу времени в любом сечении поро-струйных потоков:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\rho_n}{\mu_n} Q_n &= \frac{\rho_e}{\mu_e} Q_e \\ \text{или} \\ \frac{\rho_n}{\mu_n} V_n (F_n = d_n^{k_2-2,0}) &= \frac{\rho_e}{\mu_e} V_e (F_e = d_e^{k_2-2,0}) \end{aligned} \right\}; \quad (2)$$

3) постоянство количества движения и массового расхода растворов в единицу времени в любом сечении поро-струйного потока:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\rho_n}{\mu_n} Q_n \sqrt{F_n} &= \frac{\rho_e}{\mu_e} Q_e \sqrt{F_e} \\ \text{или} \\ \frac{\rho_n}{\mu_n} V_n (F_n^{1,5} = d_n^{k_3-3,0}) &= \frac{\rho_e}{\mu_e} V_e (F_e^{1,5} = d_e^{k_3-3,0}) \end{aligned} \right\}; \quad (3)$$

где  $Q_n$  — объем растворов, участвующих в насыщении пород,  $F_n$  — поперечная площадь потока растворов,  $V_n$  — скорость потока растворов,  $d_n$  — диаметр или аналогичный линейный размер потока растворов,  $\rho_n$  — плотность растворов,  $\mu_n$  — динамический коэффициент вязкости растворов, отнесенный к начальному сечению активной зоны пористой среды;  $Q_e$ ,  $F_e$ ,  $V_e$ ,  $d_e$ ,  $\rho_e$  и  $\mu_e$  — аналогичные параметры для потока растворов в сечении активной зоны, удаленном от начального на расстояние  $l$ .

Исходя из принятого расширения поро-струйных потоков относительно оси значения  $d_e = \sqrt{F_e}$  определяли по формуле:

$$d_e = d_n \left( 1 + \frac{l}{Z} \right)^n, \quad (4)$$

где  $n$  — показатель, учитывающий степень фильтрационной анизотропии пород и определяющий форму потоков в их поперечном сечении; при плоском потоке ( $K_{\phi_x} = 0$ ) показатель  $n = 0,5$ , осесимметричном (круглом) потоке ( $K_{\phi_x} = K_{\phi_y}$ )  $n = 1,0$ , уплощенном ( $K_{\phi_x} \neq K_{\phi_y}$ ) или комбинированном (плоском + круглом) потоке  $1,0 > n > 0,5$ ;

$Z = \frac{r_n}{\text{tg}\phi} = \frac{d_n}{2\text{tg}\phi}$  — постоянная продольная линейная величина для конкретного потока, определяю-

щая угол его расширения относительно оси  $X$ ;  $d_n$  или  $r_n$  — диаметр или радиус пор;  $\phi$  —  $\frac{1}{2}$  угла расширения потока.

Согласно (4), при  $Z \rightarrow \infty$  диаметр потока  $d_e \rightarrow d_n$ . В этом случае пассивные зоны в пористой среде отсутствуют, т. е. в растворопереносе участвуют все поры. При  $Z \rightarrow 0$  вся пористая среда будет представлена пассивными зонами.

Для обоснования закономерностей изменения средней скорости потока растворов во фронте насыщения (увлажнения) пористой среды рассмотрены три возможных гидродинамических схемы взаимодействия поро-струйных потоков:

1. Среднюю скорость движения потоков вглубь массива пород определяют средние скорости потоков в порах соответствующих поперечных сечений площадью  $F_e$ . Согласно уравнений (1) — (3) и формуле (4), скорость:

$$V_e = \left( \frac{\rho_n \mu_e}{\mu_n \rho_e} \right)^{0,5 \text{ или } 1,0} \times \frac{V_n Z^{kn}}{(Z+l)^{kn}}. \quad (5)$$

2. Среднюю скорость движения потоков определяют в основном средние скорости потоков в порах соответствующих поперечных сечений площадью  $\Delta F_e = F_e - F_n$ . Это происходит, когда в каждом поро-струйном потоке  $\Delta F_e \gg F_n$  и поперечный размер поро-струйного потока:

$$d_e = \Delta d_e = \sqrt{\Delta F_e} \rightarrow d_n \left( \frac{l}{Z} \right)^n, \quad (6)$$

а его скорость, согласно уравнениям (1) — (3) и формуле (6):

$$V_e = \left( \frac{\rho_n \mu_e}{\mu_n \rho_e} \right)^{0,5 \text{ или } 1,0} \times V_n \left( \frac{Z}{l} \right)^{kn}. \quad (7)$$

3. В системе поро-струйных потоков при соизмеримых площадях  $\Delta F_e$  и  $F_n$  средняя скорость движения растворов во фронте насыщения зависит главным образом от скорости потоков в осевых порах:

$$V_e = \left( \frac{\rho_n \mu_e}{\mu_n \rho_e} \right)^{0,5 \text{ или } 1,0} \times V_n \frac{Z^{kn}}{Z^{kn} + l^{kn}}. \quad (8)$$

Согласно (5), (7) и (8), расчетное время насыщения пористых сред выщелачивающими растворами соответственно составит:

$$t = \left( \frac{\mu_n \rho_e}{\rho_n \mu_e} \right)^{0,5 \text{ или } 1,0} \times \frac{l}{V_n} \times \left( 1 + \frac{l}{Z} \right)^{kn}. \quad (9)$$

$$t = \left( \frac{\mu_n \rho_e}{\rho_n \mu_e} \right)^{0,5 \text{ или } 1,0} \times \frac{l}{V_n} \times \left( \frac{l}{Z} \right)^{kn}. \quad (10)$$

$$t = \left( \frac{\mu_n \rho_e}{\rho_n \mu_e} \right)^{0,5 \text{ или } 1,0} \times \frac{l}{V_n} \times \left[ 1 + \left( \frac{l}{Z} \right)^{kn} \right]. \quad (11)$$

В формулах (5), (7) — (11) значения произведения  $k \cdot n$  находятся в следующих пределах:

Краткая характеристика пород и исходные данные для расчетов скорости движения растворов в пористых средах пород

Порода	Пористость, %		Средние $K_{\phi}$ ( $M/сут.$ ) пород по лабораторным данным		Средний коэффициент фильтрационной анизотропии пород, $K_{\phi=} / K_{\phi \perp}$	Направление движения растворов при насыщении пород, анализируемая глубина проникновения растворов ( $l$ )	Исходные данные для расчетов по формулам					
	общая	эффективная	перпендикулярно напластованию $K_{\phi \perp}$	параллельно напластованию $K_{\phi =}$			$V_n$ , мм/ч	$Z$ , мм	$k \cdot n$	$n$	формула	примечание
<i>Первая группа</i>												
Гранит-порфир	1,5	1,1	$\geq 1,2 \cdot 10^{-3}$			Горизонтальное, $l \leq 100$ мм	0,2	27,0	3,0	1,0	(14)	
Фельзит-порфир	1,5	1,1				Горизонтальное, $l \leq 90$ мм	0,16	30,0	3,0	1,0	(14)	
Гранит	2,4	0,89				Горизонтальное, $l \leq 60$ мм	0,10	23,5	3,0	1,0	(14)	
Аргиллит	1,1	0,72				Горизонтальное, $l \leq 50$ мм	0,10	18,0	3,0	1,0	(14)	
Трахидацил	2,54	0,61				Горизонтальное, $l \leq 40$ мм	0,03	20,5	3,0	1,0	(14)	
Базальт	1,3	0,57				Горизонтальное, $l \leq 30$ мм	0,013	19,0	3,0	1,0	(14)	
<i>Вторая группа</i>												
Алевролит	8–10		$3 \cdot 10^{-3}$			Вертикально вверх, перпендикулярно слоистости, $l \leq 90$ мм	2,0	70,0	3,0	1,0	(14)	
Песчаник глинистый мелко- и среднезернистый	16–18		$1,6 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	20,6	Горизонтальное, параллельно напластования, $l \leq 35$ мм	8,0	8,0	1,5	0,5	(14)	$l \leq 8$ мм
							$V_n Z^{0,5} = 11,9$		0,5	0,5	(13)	$l > 8$ мм
Песчаник с глинистым цементом, средне- и грубозернистый	13–15		$3 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	11,3	Горизонтальное, параллельно напластования, $l \leq 35$ мм	17,0	4,5	2,2	0,724	(14)	$l \leq 6$ мм
							$V_n Z^{0,724} = 20,7$		0,724	0,724	(13)	$l > 6$ мм
<i>Третья группа</i>												
Песчаник кварцевый мелко- и среднезернистый	13–15		$1,8 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	0,61	Горизонтальное, параллельно напластования, $l \leq 35$ мм	100,0	9,0	2,9	0,96	(14)	$l \leq 5-10$ мм
							$V_n Z^{0,96} = 400$		0,96	0,96	(14)	$l > 5-10$ мм
Песчаник кварцевый, средне- и грубозернистый	15–17		$3 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$	0,60	Горизонтальное, параллельно напластования, $l \leq 35$ мм	280,0	7,5	2,8	0,925	(14)	$l \leq 8$ мм
							$V_n Z^{0,925} = 820$		0,925	0,925	(13)	$l > 8$ мм

Примечание. Насыщение серной кислотой образцов пород первой группы производили растворами с концентрацией 30,0; алевролита 3,0 и остальных пород 2,0 г/л.

$1,0 \geq k_1 \cdot n \geq 0,5$  для (1),  $2,0 \geq k_2 \cdot n \geq 1,0$  для (2),  $3,0 \geq k_3 \cdot n \geq 1,5$  для (3). Минимальные значения  $k \cdot n = 0,5$ ; 1,0 и 1,5 соответствуют породам с максимальной степенью фильтрационной анизотропии, когда  $K_{\phi_z} \rightarrow 0$  или  $K_{\phi_1} \gg K_{\phi_z}$ . Максимальные значения  $k \cdot n$  1,0; 2,0 и 3,0 относятся к породам, у которых фильтрационная анизотропия отсутствует ( $K_{\phi_z} = K_{\phi_1}$ ) или весьма незначительна,  $K_{\phi_z} \cong K_{\phi_1}$ .

Из (5), (7) и (8) также следует, что плотность и вязкость выщелачивающих растворов в активных зонах насыщаемых пород в каждом конкретном случае могут влиять только на абсолютные значения скоростей  $V_n$  и  $V_e$ , а не на закономерности движения этих растворов в пористых средах. Поэтому указанные формулы были представлены в следующем виде:

$$V_e(Z + l)^{kn} = V_n Z^{kn} = \text{const}, \quad (12)$$

$$V_e l^{kn} = V_n Z^{kn} = \text{const}, \quad (13)$$

$$V_e(Z^{kn} + l^{kn}) = V_n Z^{kn} = \text{const}. \quad (14)$$

Анализ (13) и (14) показал, что относительному расстоянию  $\frac{l}{Z} = 1$  соответствует отношение  $\frac{V_e}{V_n} = 1,0$  и 0,5 при любом значении произведения  $k \cdot n$ . При-

чем, согласно (13), отношение скоростей  $\frac{V_e}{V_n} = 1,0$  должно сохраняться в пределах всей длины  $l < Z$ . Согласно (12), отношение  $\frac{V_e}{V_n}$ , соответствующее отношению  $\frac{l}{Z} = 1$ , не является постоянной величиной, а изменяется от 0,71 при движении растворов, согласно (1) со значением показателя  $n = 0,5$ , до 0,125 при движении растворов, согласно (3) со значением показателя  $n = 1,0$ .

Сравнение расчетных  $V_e$  и  $t$  с экспериментально установленными базировалось на анализе зависимостей  $V_e = f(l)$  и  $t = f(l)$ . Анализировали три группы пород (таблица). Породы первых двух групп относятся к плохо проницаемым, а средний коэффициент фильтрационной анизотропии ( $\frac{K_{\phi_1}}{K_{\phi_z}}$ ) у отдельных пород достигает 20,6. Породы третьей группы хорошо проницаемые, со средним коэффициентом фильтрационной анизотропии около 0,6. Методика анализа предусматривала сопоставление расчетных данных с фактическими  $V_e$  и  $t$  для каждого уравнения движения выщелачивающих растворов.

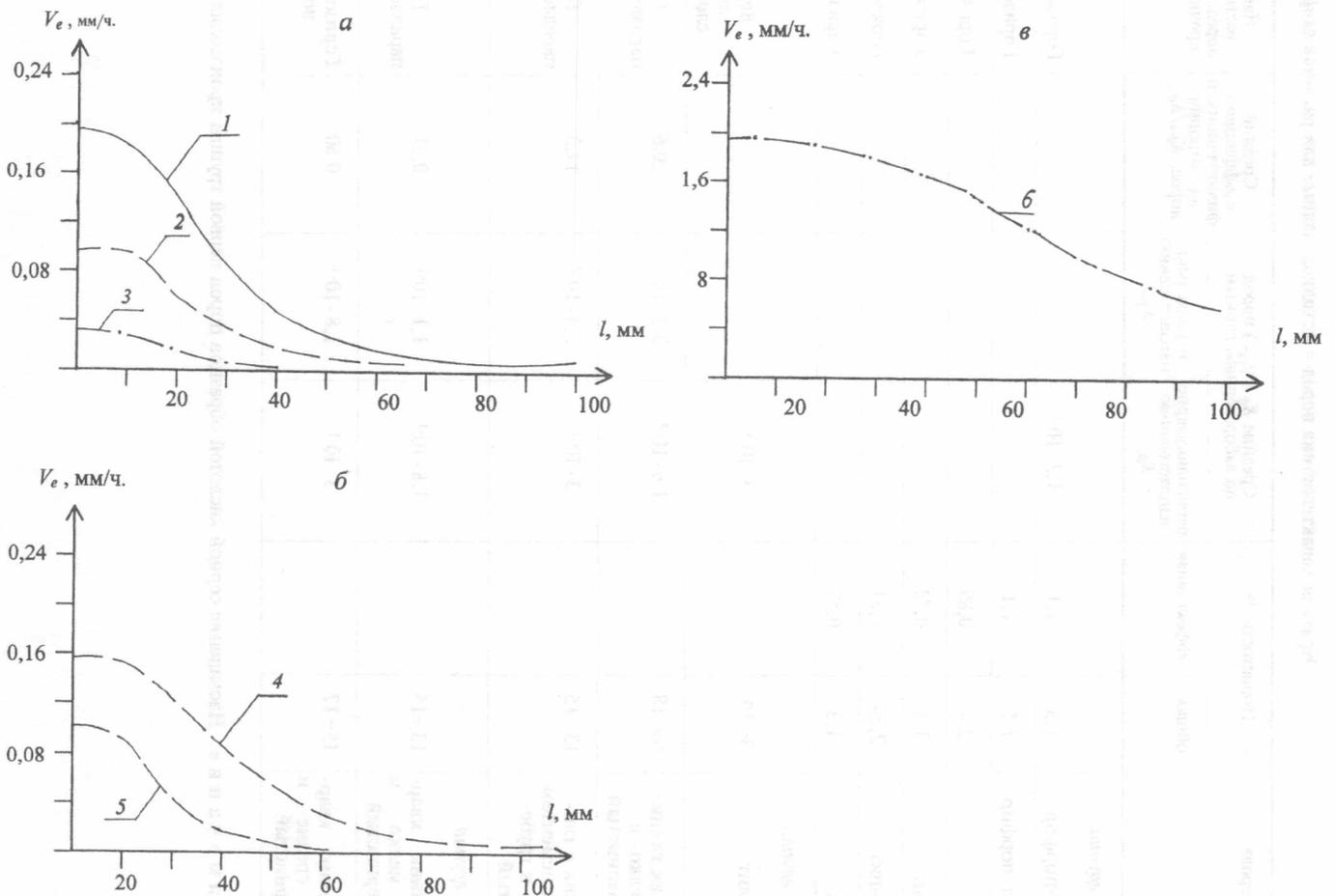


Рис. 2. Зависимость средней скорости движения растворов ( $V_e$ ) от глубины насыщения пористой среды ( $l$ ) для образцов различных пород: 1 — гранит-порфир; 2 — гранит; 3 — трахидацит (а); 4 — фельзит-порфир; 5 — аргиллит (б); 6 — алевролит (в)

В результате установлено, что закономерности движения растворов в пористых средах плохо проницаемых пород с общей пористостью  $\leq 8-10\%$  хорошо согласуются с (14) при значениях расстояния  $Z$ , строго соответствующих скорости  $V_e = 0,5V_n$ , показателю  $n = 1,0$  и произведению  $k \cdot n = 3,0$  (рис. 2). Следовательно, движение растворов в таких породах подчинялось уравнению (3), а поро-струйные потоки имели осесимметричную (круглую) форму, т. е. по пути движения растворов фильтрационная анизотропия у пород практически отсутствовала. При этом прослеживается прямолинейная зависимость  $Z$  (таблица, рис. 2) от начальной эффективной пористости пород ( $P_{эф}$ , дол. ед.), которую можно представить в виде:

$$Z = (2600 + 3300)P_{эф}, \text{ мм.} \quad (15)$$

Для других типов плохо проницаемых пород (песчаников) с общей пористостью  $13-18\%$  при средних коэффициентах фильтрационной анизотропии  $20,6$  и  $11,3$  (табл. 1) выявлены следующие закономерности движения растворов. На начальной стадии насыщения параллельно напластования пород движение растворов в пределах  $l \leq 8-10$  мм подчиняется (14) со значениями  $k \cdot n = 1,5-2,5$  и  $Z \leq 8-10$  мм. При больших глуби-

нах от поверхности насыщаемых образцов пород изменение фактических скоростей  $V_e = f(l)$  хорошо согласуется с расчетными  $V_e$ , по (13), при средних значениях показателя  $n \approx 0,52$  для песчаников с глинистым цементом. Следовательно, при насыщении растворами серной кислоты разнородных глинистых песчаников и песчаников с глинистым цементом параллельно напластованию пород поро-струйные потоки имели соответственно практически плоскую и уплощенную или комбинированную формы. Движение растворов в пористых средах данных пород на начальной стадии их насыщения подчинялась (3), а на глубинах  $l > 8-10$  мм — (1). Соответствующие графики для отдельных образцов приведены на рис. 3.

Движение растворов в плохо проницаемых песчаниках перпендикулярно напластованию пород в пределах глубины насыщения  $l \leq 35$  мм отвечает в большинстве случаев (3) с показателем  $k_3 \cdot n = 2,5-3,0$ .

Аналогичные закономерности движения растворов установлены и при насыщении пористых сред хорошо проницаемых пород, представленных разнородными кварцевыми песчаниками (таблица, рис. 3). При среднем коэффициенте филь-

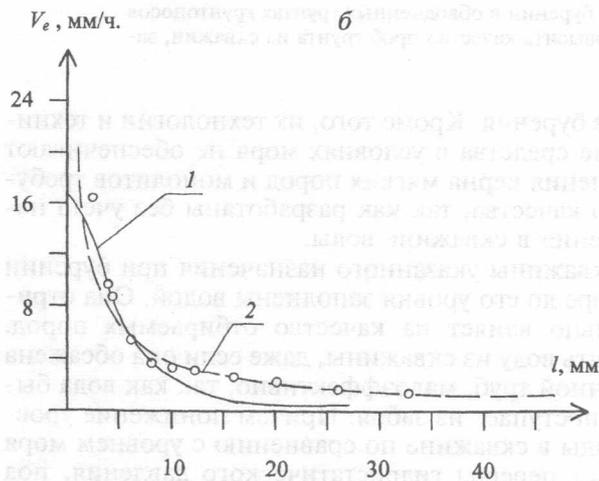
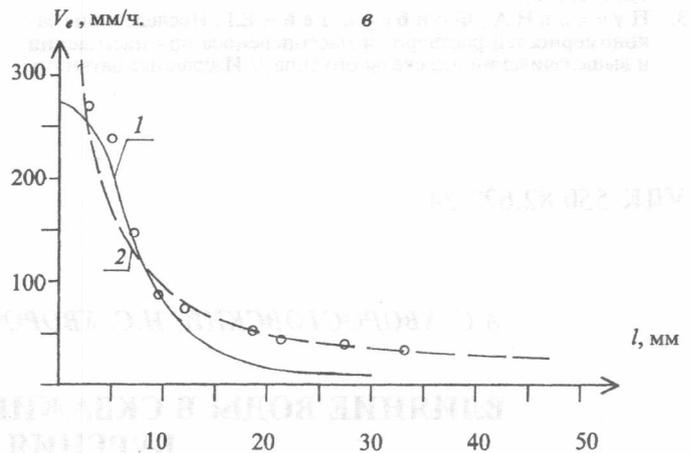
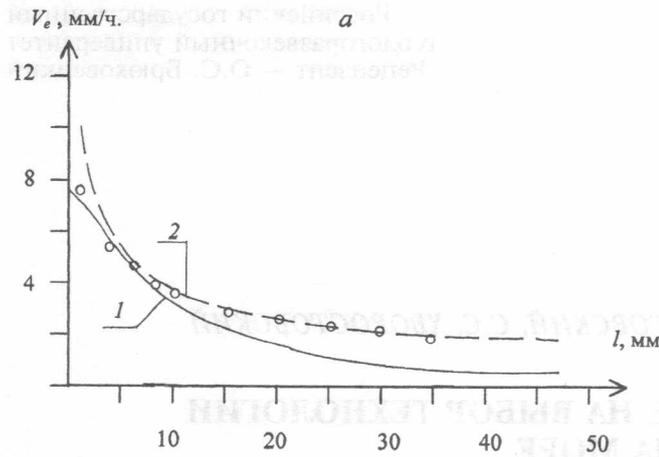


Рис. 3. Зависимость средней скорости движения растворов ( $V_e$ ) от глубины насыщения пористой среды ( $l$ ) для образцов различных пород: а — глинистый песчаник; б — песчаник с глинистым цементом; в — кварцевый песчаник; 1 — по формуле (14); 2 — по (13)

традиционной анизотропии около 0,6 фактический показатель  $n$  для данных пород находился в пределах 0,8—1,0, т. е. насыщение их пористых сред осуществляли порово-струйные потоки, имеющие практически осесимметричную (круглую) или комбинированную (в основном круглую и частично уплощенную) форму. При этом движение растворов на начальной стадии чаще подчинялось (3), а при значениях  $l \geq 10$  мм — только (1).

Учитывая расчетные значения и данные экспериментальных исследований, отметим, что при глубинах насыщения образцов пород  $l \geq 35$  мм фактические и расчетные скорости движения растворов в пористых средах (рис. 2, 3) достаточно хорошо совпадают с коэффициентами фильтрации этих пород (таблица).

В частности, для гранит-порфира  $V_e \leq 1,5 \cdot 10^{-3}$  м/сут., у глинистого песчаника и песчаника с глинистым цементом  $V_e \leq (4 \div 5) \cdot 10^{-2}$  м/сут., кварцевого песча-

ника  $V_e \leq 8 \cdot 10^{-1}$  м/сут. В этой связи можно предположить, что начальные скорости насыщения пористых сред  $V_n$ , по-видимому, соответствуют начальным коэффициентам фильтрации пород, т. е. в раствороненасыщенном состоянии.

Из сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований можно констатировать, что закономерности растворопереноса или движения выщелачивающих растворов в пористых средах пород с коэффициентами фильтрации  $K_\phi < 0,5$  м/сут. подчиняется уравнениям (1) и (3), в которых необходимо учитывать форму (структуру) потоков, зависящую от коэффициента фильтрационной анизотропии пород, а также эффективную пористость насыщаемой среды, размеры пор (диаметр и коэффициент извилистости) и начальный коэффициент фильтрации пород, определяющие начальную скорость, продольные и поперечные размеры порово-струйных потоков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бакуров В.Г., Вечёркин С.Г., Луценко Н.К. Подземное выщелачивание урановых руд. М.: Атомиздат, 1969. 151 с.
2. Луценко Н.К., Белецкий В.Н., Давыдова Л.Г. Бесшахтная разработка рудных месторождений. М.: Недра, 1986. 177 с.
3. Пучков Н.А., Фонберштейн Е.Г. Исследование закономерностей раство- и массопереноса при насыщении и выщелачивании руд скального типа // Избранные научн. тр.

Московского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе. М.: Экос, 2004. С. 199—218.

Российский государственный геологоразведочный университет  
Рецензент — О.С. Брюховецкий

УДК 550.82:622.24

*А.С. ХВОРОСТОВСКИЙ, И.С. ХВОРОСТОВСКИЙ, С.С. ХВОРОСТОВСКИЙ*

## ВЛИЯНИЕ ВОДЫ В СКВАЖИНЕ НА ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ БУРЕНИЯ НА МОРЕ

Обоснована необходимость создания и использования при бурении в обводненных грунтах грунтоносов с открытым верхним концом (прямоточных), позволяющих повысить качество проб грунта из скважин, заполненных водой.

Инженерно-геологические, геоэкологические, разведочные и картировочные скважины на море глубиной до 100 м в породах по экономическим соображениям бурят преимущественно с плавоснований. При бурении таких скважин высокие требования предъявляют к качеству керна и пробам грунта. При бурении инженерно-геологических скважин с целью изучения физико-механических свойств грунтов необходимо отбирать их образцы со сложением, близким к природному (монолиты).

На суше скважины аналогичного назначения бурят вдавливающим, забивным, вибрационным и вращательным способами. На море качка и дрейф плавоснования, вызываемые течениями и волнением моря, ограничивают возможности этих спо-

собов бурения. Кроме того, их технологии и технические средства в условиях моря не обеспечивают получения керна мягких пород и монолитов требуемого качества, так как разработаны без учета нахождения в скважине воды.

Скважины указанного назначения при бурении на море до его уровня заполнены водой. Она отрицательно влияет на качество отбираемых пород. Удалять воду из скважины, даже если она обсажена колонной труб, малоэффективно, так как вода быстро поступает из забоя. Причем понижение уровня воды в скважине по сравнению с уровнем моря создает перепад гидростатического давления, под действием которого в колонну из забоя выдавливаются водонасыщенные грунты. Это отрицательно