

Н. С. ПЕТРОВ, А. Ю. НОРВАТОВ, И. В. РУСАНОВ

**ОПЫТНО-МИГРАЦИОННОЕ ОПРОБОВАНИЕ
ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТЫХ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД
НА ЭСТОНСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ**

N. PETROV, Y. NORVATOV, I. RUSANOV

**MIGRATION TESTS IN FISSURED-POROUS
CARBONATE ROCKS OF THE OIL-SHALE
DEPOSIT OF THE 'ESTONIAN' FIELD**

В результате многолетней эксплуатации сланцевых шахт, которая сопровождалась интенсивным дренированием подземных вод, в Кохтла-Ярвеском горно-промышленном районе значительно изменился гидродинамический режим водоносных горизонтов и уменьшились статические запасы пресных подземных вод, широко используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Чтобы оценить экологическую ситуацию, разработать комплекс водоохраных мероприятий и обосновать схемы искусственного восполнения запасов подземных вод, необходимо определить миграционные параметры трещиновато-пористых карбонатных пород ордовика. Впервые это было сделано для района Вазаверской долины при проведении полевых опытно-миграционных работ (ОМР). Эксперименты включали импульсные запуски индикаторов в наблюдательные скважины опытного куста и специализированные опробования водоносной толщи ордовика по схеме "дуплет".

Участок опытного куста располагался в краевой части Вазаверской погребенной долины. В его пределах буровыми скважинами вскрыты водоносные горизонты четвертичных и ордовикских карбонатных отложений, разделенных водоупором моренных суглинков мощностью 1,4 м. Горизонты гидравлически слабо связаны между собой — разрыв статических уровней обоих горизонтов составляет 1,4 м. Методами скважинной геофизики (расходомерия и резистивиметрия) в толще опробуемых карбонатных пород зафиксированы две трещиноватые водопроводящие зоны (интервалы 19,50—20,30 м и 18,80—19,05 м). Схема опытного куста* и особенности геологического строения участка, на котором он расположен, представлены на рис. 1.

Особенности массопереноса вещества в трещиновато-пористых карбонатных породах ордовика связаны прежде всего с гетерогенностью такого рода пород, то есть с присутствием в пределах карбонатной толщи

* Опытный куст предназначался и для проведения опытно-фильтрационных работ, результаты которых будут рассмотрены отдельно.

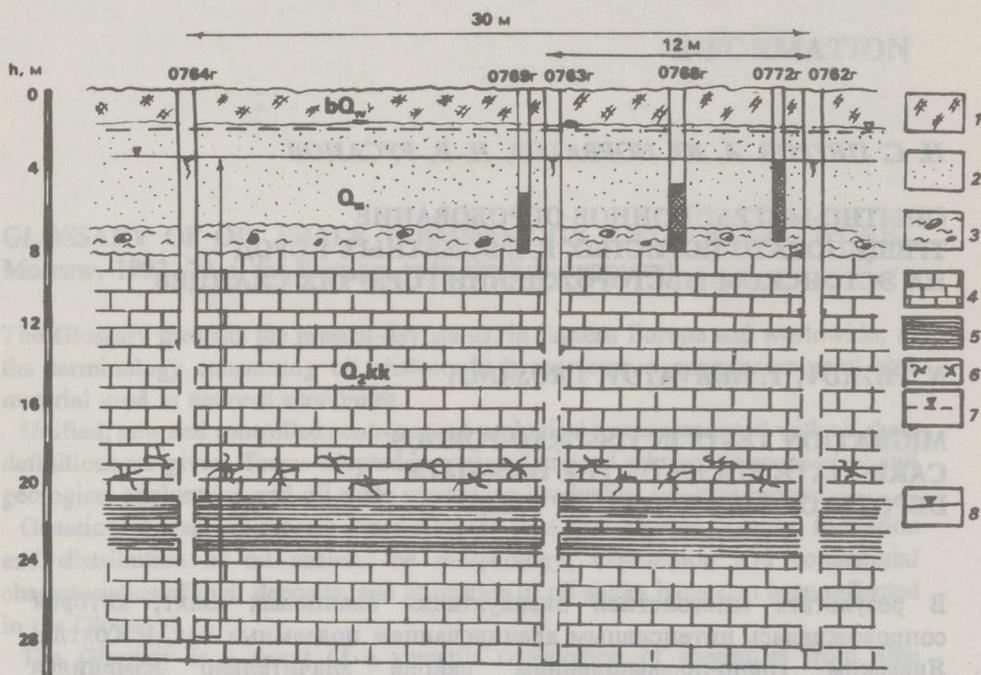


Рис. 1. Схема расположения скважин и геолого-гидрогеологический разрез опытного куста: 1 — торф, 2 — пески, 3 — моренные суглинки, 4 — известняк, 5 — горючий сланец, 6 — зона трещиноватости, 7 — уровень грунтовых вод, 8 — пьезометрический уровень вод ордовика

Fig. 1. Location of wells and geologic-hydrogeological section of the multiwell system: 1 - peat, 2 - sands, 3 - moraine loam, 4 - limestone, 5 - oil shale, 6 - fracture zone, 7 - groundwater level, 8 - piezometric level of Ordovician water

подсистем с резко различающимися фильтрационными свойствами и уровнями массопереноса — трещин и пористых блоков. В таких блоках распределение вещества контролируется молекулярной диффузией. В зависимости от масштаба и времени миграции для такой системы возможно использование различных расчетных схем массопереноса [2]. Реализация этих систем основана на необходимости привлекать в расчетах численные значения таких миграционных параметров, как активная трещиноватость пород, и комплексного параметра массообмена между трещинами и пористыми блоками, а также затрагиваемой массообменом толщи. Определить эти параметры можно лишь на основе полевых ОМР, которые, как правило, представляют собой единичные эксперименты: исследовательского характера и не являются, к сожалению, массовым видом гидрогеологических работ.

Согласно миграционной схеме "дуплет" индикатор нагнетается в одну из скважин при одновременном отборе пластовой воды (с равным расходом) из другой. Такая схема опробования позволяет охватить опытным воздействием значительную область пласта, что немаловажно для трещиновато-пористых пород.

При обосновании расчетной модели для интерпретации результатов ОМР необходимо учитывать, что определяющим механизмом миграции индикатора в пласте между нагнетательной и водозаборной скважинами является конвекция, осложненная процессами гидродисперсии по трещинам и массоотдачей вещества из трещин в пористые блоки. Реально эти факторы могут быть учтены в расчетной гетерогенной схеме, для которой альтернативным механизмом рассеяния является кинетика массообменных процессов, а ограниченностью блоков для характерных временных диапазонов полевых опытов и гидродисперсий при этом можно пренебречь. В этом случае основными миграционными параметрами являются коэффициент активной трещиноватости пород (n) и массообменные параметры блоков: пористость (n_0), коэффициент молекулярной диффузии (D_m) и удельная поверхность (S_δ).

Расчетные формулы для дуплетного опробования пласта трещиновато-пористых пород можно получить из известного решения Лаверье [4]

$$\bar{C} = \operatorname{erfc} \left(\frac{t_0 S_\delta \sqrt{n_0 D_m}}{2n \sqrt{t - t_0}} \right), \quad (1)$$

где \bar{C} — относительная концентрация индикатора в водозаборной скважине на момент времени t ;

t_0 — параметр, зависящий от структуры потока и отвечающий времени, которое потребовалось бы меченой частице жидкости, чтобы переместиться вдоль линий тока от нагнетательной до водозаборной скважины в пределах опробуемого пласта.

При удельном дебите откачки-нагнетания q и расстоянии R между скважинами выражение для времени t_0 имеет вид [2]

$$t_0(\alpha) = \frac{\pi R^2 n}{q} \left(\frac{\sin \alpha - \alpha \cos \alpha}{\sin^3 \alpha} \right), \quad (2)$$

где α — центральный угол для фиксированной линии тока.

Тогда формула (1) трансформируется в следующее интегральное выражение:

$$\bar{C} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\alpha_{\max}} \operatorname{erfc} \left(\frac{S_\delta \sqrt{D_m n_0} t_0(\alpha)}{2n \sqrt{t - t_0(\alpha)}} \right) d\alpha, \quad (3)$$

где интеграл решается численными методами. Верхний предел интегрирования α_{\max} определяется из соотношения $t_0(\alpha) = t$; при $\alpha = 0$ (кратчайшая линия тока) время $t_0(0) = \pi R^2 n / 3q$.

В работе [2] для интерпретации результатов экспериментов, проводимых по схеме "дуплет" в гетерогенных комплексах пород, предлагаются типовые графики. На рис. 2 представлены кривые, рассчитанные для характерных значений безразмерных параметров переноса в трещиновато-пористых породах:

$$\lambda = \frac{4n^2}{t_0 S_0^2 D_m n_0}, \quad \bar{t} = \frac{t}{t_0}, \quad (4)$$

где $t_0 = (R/q)n$; $q = Q/m$ — удельный дебит откачки-нагнетания (m — мощность опробуемого пласта).

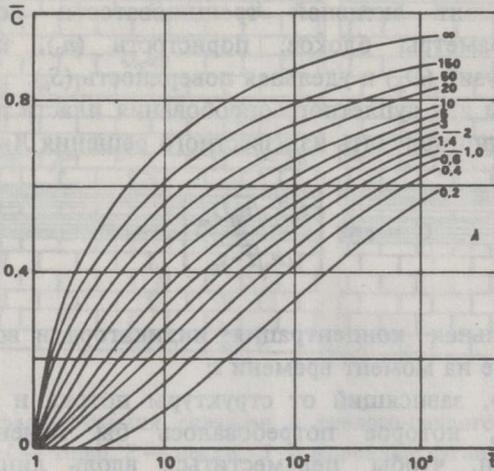


Fig. 2. Characteristic curves for interpretation of doublet tests in fissured-porous rocks; curves' legend - parameters:

$$\lambda = \frac{4qn}{S_0^2 D_m n_0 R^2}; \quad \bar{t} = \frac{qt}{R^2 n}$$

Рис. 2. Типовые кривые для интерпретации опытов по опробованию трещиновато-пористых пород по схеме "дуплет"; шифры кривых — параметры:

$$\lambda = \frac{4qn}{S_0^2 D_m n_0 R^2}; \quad \bar{t} = \frac{qt}{R^2 n}$$

Обработку результатов миграционных опытов с использованием типовых кривых удобно проводить в следующей последовательности. Задавая фиксированные значения коэффициента трещиноватости, рассчитывают безразмерное время процесса $\bar{t} = t/t_0 = qt/R^2n$. Затем полученные в опыте концентрационные точки (относительные концентрации) наносятся на типовой график в координатах \bar{c} — \bar{t} . Если эти точки хорошо аппроксимируются какой-либо типовой кривой графика, то, используя значения ее шифра (λ), определяют комплексный параметр рассеяния:

$$S_0^2 D_m n_0 = \frac{4qn}{\lambda R^2}. \quad (5)$$

Если фактическая концентрационная кривая не соответствует характеру типовых кривых, то принятые значения коэффициента трещиноватости корректируются, а опытная кривая отстраивается заново.

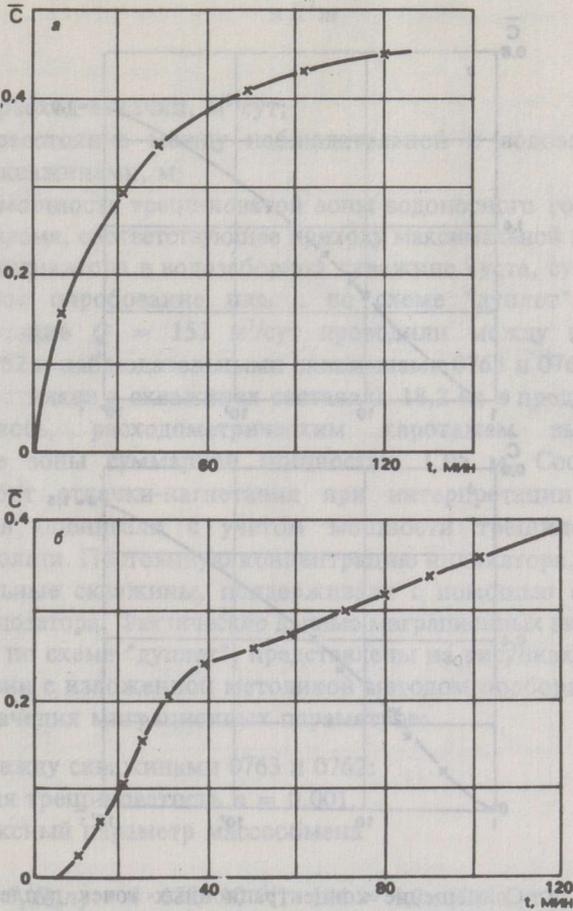


Рис. 3. Выходные концентрационные кривые миграционных опытов по схеме "дуплет": а — между скважинами 0763 и 0762; б — между скважинами 0764 и 0762

Fig. 3. Yield concentration curves of migration doublet tests: а — between wells 0763 and 0762; б — between wells 0764 and 0762

При известных значениях коэффициентов молекулярной диффузии (D_m) и пористости блоков (μ) можно рассчитать удельную поверхность блоков (S_v); обычно величины D_m и μ определяются независимыми лабораторными методами. По опыту изучения диффузионных и емкостных свойств карбонатных известняков в Славянской горно-промышленном районе можно принять $D_m = 1 \cdot 10^{-5}$ м²/сут и $\mu = 0,20$ [3]. Тогда величина удельной поверхности блоков будет величина 10—30 м.

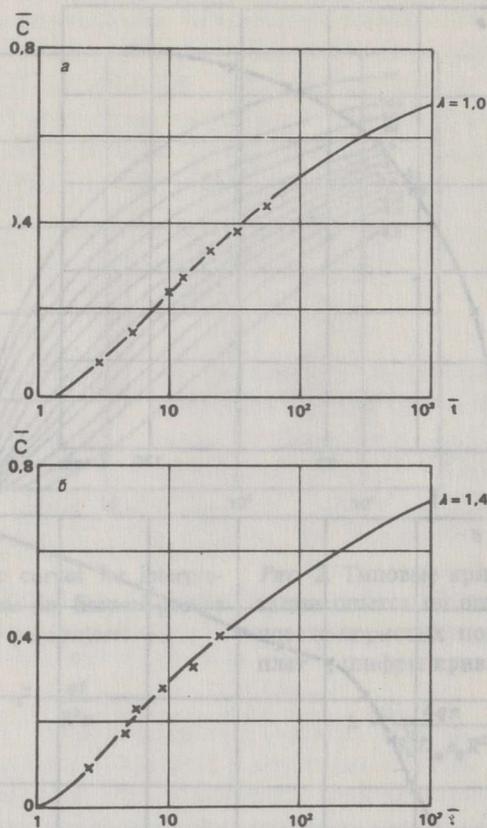


Рис. 4. Совмещение концентрационных точек душетных опытов с типовыми кривыми: а — "душет" между скважинами 0763 и 0762, шифр кривой $\lambda = 1,0$ и $n = 1 \cdot 10^{-3}$; б — "душет" между скважинами 0764 и 0762, шифр кривой $\lambda = 1,4$ и $n = 5 \cdot 10^{-4}$

Fig. 4. Fitting of doublet tests' concentration points to characteristic curves: a - doublet between wells 0763 and 0762, $\lambda = 1.0$ and $n = 1 \cdot 10^{-3}$; б - doublet between wells 0764 and 0763, $\lambda = 1.4$ and $n = 5 \cdot 10^{-4}$

Импульсные запуски индикатора в наблюдательные скважины проводятся обычно на последних этапах откачки в условиях квазистационарного режима фильтрации. При этом величина активной трещиноватости опробуемой толщи определяется по следующей балансовой формуле:

$$n = \frac{Qt_{\max}}{\pi R^2 m}, \quad (6)$$

где Q — расход откачки, м³/сут;
 R — расстояние между наблюдательной и водозаборной скважинами, м;
 m — мощность трещиноватой зоны водоносного горизонта, м;
 t_{\max} — время, соответствующее приходу максимальной концентрации индикатора в водозаборной скважине куста, сут.

Миграционное опробование пласта по схеме "дуплет" с расходом откачка-нагнетание $Q = 152$ м³/сут проводили между водозаборной скважиной 0762 и наблюдательными скважинами 0763 и 0764. Открытый интервал известняков в скважинах составлял 18,2 м; в пределах его, как уже отмечалось, расходометрическим каротажем выделено две трещиноватые зоны суммарной мощностью 1,05 м. Соответственно, удельный дебит откачки-нагнетания при интерпретации результатов экспериментов оценивали с учетом мощности трещиноватой зоны опробуемой толщи. Постоянную концентрацию индикатора, подаваемого в наблюдательные скважины, поддерживали с помощью специального устройства — дозатора. Фактические данные миграционных экспериментов, выполненных по схеме "дуплет", представлены на рисунках 3 и 4.

В соответствии с изложенной методикой методом подбора определены численные значения миграционных параметров:

1. "Дуплет" между скважинами 0763 и 0762:
 — активная трещиноватость $n = 0,001$,
 — комплексный параметр массообмена

$$S_i^2 D_m n_0 = 4 \cdot 152 \cdot 10^{-3} / 1 \cdot 144 = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}.$$

2. "Дуплет" между скважинами 0764 и 0762:
 — активная трещиноватость $n = 5 \cdot 10^{-4}$,
 — комплексный параметр массообмена

$$S_i^2 D_m n_0 = 4 \cdot 152 \cdot 5 \cdot 10^{-4} / 1,4 \cdot 900 = 0,24 \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}.$$

При известных значениях коэффициентов молекулярной диффузии (D_m) и пористости блоков (n_0) можно рассчитать удельную поверхность блоков (S_i); обычно величины D_m и n_0 определяются независимо, лабораторными методами. По опыту изучения диффузионных и емкостных свойств ордовикских известняков в Сланцевском горно-промышленном районе можно принять $D_m = 1 \cdot 10^{-5}$ м²/сут и $n_0 = 0,20$ [3]. Тогда величина удельной поверхности блоков будет порядка 10—30 м.

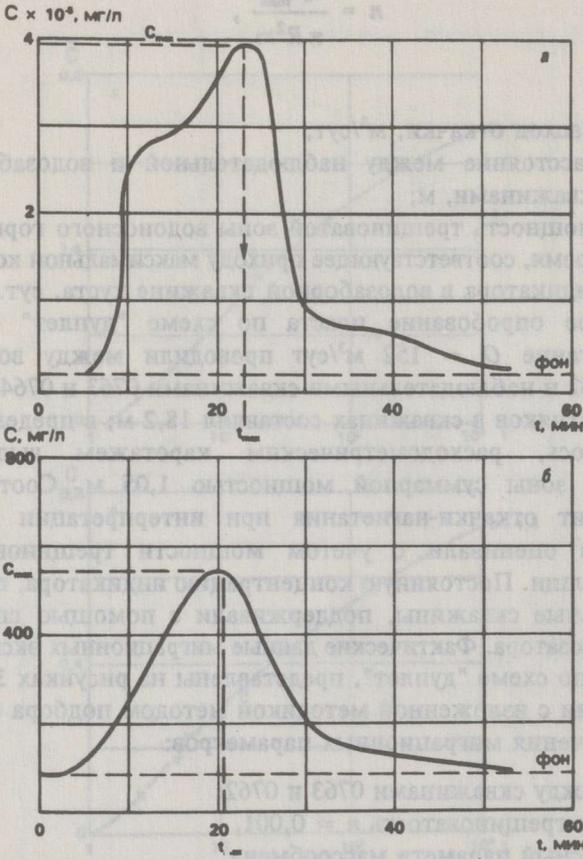


Рис. 5. Выходные концентрационные кривые импульсных запусков индикаторов в наблюдательную скважину 0764: а — по флуоресцину, б — по хлорид-иону

Fig. 5. Yield concentration curves of impulse injection of traces into observation well 0764: а - for fluorescein; б - for chloride ion

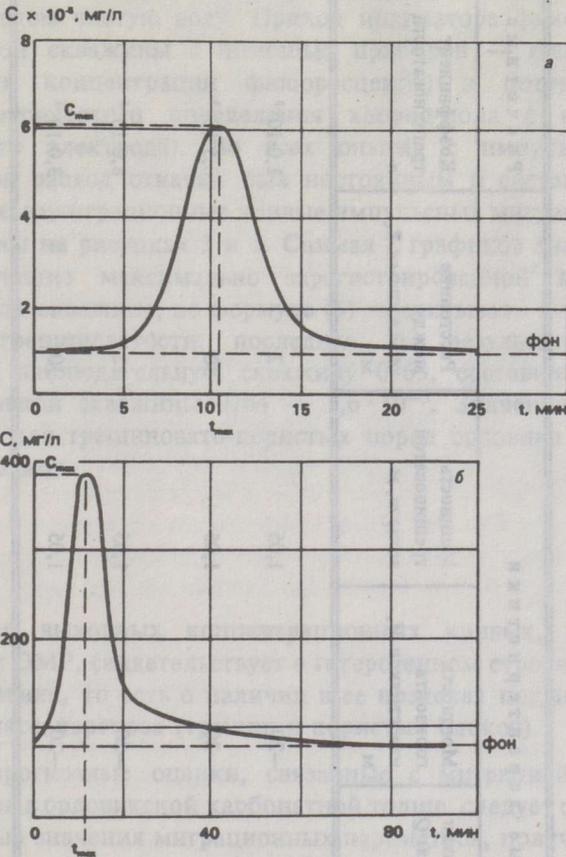


Рис. 6. Выходные концентрационные кривые импульсных запусков индикаторов в наблюдательную скважину 0763: а — по флуоресцину, б — по хлорид-иону

Fig. 6. Yield concentration curves of impulse injection of traces into observation well 0763: a - for fluorescein; б - for chloride ion

Результаты миграционных экспериментов по опробованию карбонатной толщи ордовика
Results of migration tests of Ordovician carbonate rocks

Схема эксперимента	Опытные характеристики					Расчетные параметры		
	Дебит откачки (нагнетания) Q , м ³ /сут	Мощность горизонта известняков M , м	Мощность трещиноватой зоны m , м	Расстояние между скважинами R , м	Коэффициент трещиноватости π	Массовый параметр, сут ⁻¹		
«Дуплет» между скважинами: 0762 и 0763	152	-20	1,05	12	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$		
	152	-20	1,05	30	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,24 \cdot 10^{-3}$		
Импульсный запуск в скважине: 0763	532	-20	1,05	12	$8,0 \cdot 10^{-3}$	-		
	532	-20	1,05	30	$3,0 \cdot 10^{-3}$	-		

Импульсные запуски индикаторов в скважины 0763 и 0764 были выполнены перед проведением миграционных опытов по схеме "дуплет". В качестве индикаторов были использованы растворы поваренной соли (NaCl) и флюоресцеина. На последних этапах кустовой откачки из скважины 0762, в одну из наблюдательных скважин по газовым трубам, опущенным на глубину трещиноватой зоны известняков, вводили трассер в заранее подготовленном объеме (~100 л) и задавливали его в скважину наливая следом чистую воду. Приход индикатора фиксировали в воде водозаборной скважины с помощью приборов — флюориметра (для определения концентрации флюоресцеина) и потенциометра (для потенциометрического определения хлорид-иона с помощью хлор-селективного электрода). Во всех опытах с импульсным запуском индикаторов расход откачки был постоянным и составлял 432 м³/сут. Выходные концентрационные кривые импульсных миграционных опытов представлены на рисунках 5 и 6. Снимая с графиков значения времени, соответствующие максимально зарегистрированной концентрации в водозаборной скважине, по формуле (6) рассчитывали искомую величину активной трещиноватости; последняя, по результатам импульсных запусков в наблюдательную скважину 0763, составила $1,8 \cdot 10^{-2}$, для наблюдательной скважины 0764 — $1,6 \cdot 10^{-3}$. Значения миграционных параметров для трещиновато-пористых пород ордовика представлены в сводной таблице.

Выводы

1. Характер выходных концентрационных кривых, полученных по результатам ОМР, свидетельствует о гетерогенном строении карбонатной толщи ордовика, то есть о наличии в ее пределах подсистем с разными уровнями массопереноса (трещин и пористых блоков).
2. Делая прогнозные оценки, связанные с миграцией загрязняющих компонентов в ордовикской карбонатной толще, следует ориентироваться на численные значения миграционных параметров, полученных по схеме "дуплет": $n = (0,5-1,0) \cdot 10^{-3}$ и $S_s^2 D_m n_0 = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}$ (по дальней наблюдательной скважине куста). По сравнению с импульсными запусками индикаторов, предложенная схема характеризуется большими масштабными эффектами массообменного воздействия на опробуемый пласт.

N. PETROV, Y. NORVATOV, I. RUSANOV

MIGRATION TESTS IN FISSURED-POROUS CARBONATE ROCKS OF THE OIL-SHALE DEPOSIT OF THE 'ESTONIAN' FIELD

Field experiments are acknowledged as the basic methods in determining migration parameters in fissured-porous rocks.

The paper presents the results of migration tests conducted within the peripheral part of the Vasavere buried valley (Fig. 1). Migration tests have been carried out within the water-bearing strata of the Ordovician carbonate rocks 20 m in thickness, separated from the bed

of Quaternary sediments by a 1.4-m-thick loam layer. By means of geophysical research technique (flowmetry and resistivity) the presence of two fractured permeable zones at the depth intervals of 19.5—20.3 m and 18.8—19.1 m in this carbonate stratum has been detected. In the course of the experiments a pulse injection of traces, such as chloride ions and fluorescein, into the observation wells of the multiwell system was carried out and specific sampling of the Ordovician carbonate stratum conducted using the method of doublets (Figs. 2-6; Table).

The numerical values of the migration parameters obtained through migration tests, and recommended for the use in the forecast calculating schemes are as follows: the coefficient of fracturing is $(0.5—1.0) \cdot 10^{-3}$, the complex parameter of mass transport — $4.2 \cdot 10^{-3} \text{ day}^{-1}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мироненко В. А., Румынин В. Г., Учасев В. К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах. — Л., 1980.
2. Мироненко В. А., Румынин В. Г. Опытнo-миграционные работы в водоносных пластах. — М., 1986.
3. Петров Н. С. Исследование процессов самоочистки подземных вод в горнодобывающих районах (на примере Сланцевско-Кингисеппского горнопромышленного района): Автореф. канд. дис./ЛГИ. — Л., 1982.
4. Рошаль А. А., Шестаков В. М. О миграции подземных вод в слоистых пластах // Тр. ВСЕГИНГЕО, Вып. 14, 1969. С. 43—55.

Санкт-Петербургский
горный институт
им. Г. В. Плеханова,
Россия

Sankt-Petersburg
Institute of Mines
Russia

Представил Е. Рейнсалу
Поступила в редакцию
16.04.93

Presented by E. Reinsalu
Received April 16, 1993