

И. Г. Абдульманов, В. И. Ермаков, Н. С. Ростовский,  
А. Д. Рыбаков, А. Е. Попов, В. И. Селяков

### ПЕРЕСТРОЙКА СТРУКТУРЫ ПУСТОТНОГО ПРОСТРАНСТВА СРЕДЫ ПРИ ПРОПУСКАНИИ ЧЕРЕЗ НЕЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

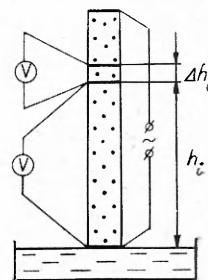
В [1—3] показано, что пропускание электрического тока через пористую насыщенную среду может приводить к изменению ее проницаемости и электропроводности. Эти изменения связаны с эффектом перестройки структуры пустотного пространства среды в результате локализации плотности энерговыделения в тонких капиллярах, лимитирующих проводимость среды. Структура пустотного пространства горных пород может быть описана в рамках перколяционной модели неоднородной среды [4] с использованием функции плотности распределения капилляров (ФПРК) по величине их эффективного радиуса. В данной работе излагаются результаты экспериментального исследования изменения структуры пустотного пространства и соответственно проницаемости песчано-глинистых пород при пропускании через них переменного электрического тока.

Основная сложность в проведении такого эксперимента связана с необходимостью разработки способов определения ФПРК, не приводящих к нарушению структуры порового пространства среды. Поэтому нами был использован специально разработанный для этих целей метод электропорометрии [5], его суть заключается в следующем. В вертикально расположенной трубке с исследуемой породой (рис. 1), торец которой погружен в сосуд с жидкостью, под действием капиллярных сил устанавливается стационарное распределение насыщенности среды, убывающей по мере увеличения высоты  $h$  поднятия жидкости. В результате с ростом  $h$  происходит увеличение удельного электросопротивления породы  $\rho_0(h)$ . Измеряя  $\rho_0(h)$  при малых напряжениях, не приводящих к изменению ФПРК, по методике [5] можно восстановить ФПРК до и после пропускания электрического тока через пористую насыщенную среду.

В качестве электропроводящей жидкости использовался раствор  $\text{CaCl}_2$ , не имеющий интенсивного ионносолевого обмена с изучаемыми породами. Концентрация раствора составляла 0,1 N во всех экспериментах. Каждая трубка диаметром 3 см и длиной 1 м заполнялась порциями сухой породы, постепенно пропитываемой раствором, поступающим через нижний торец трубки из сообщающегося сосуда так, что уровень его изменялся одновременно с верхним уровнем породы. Для определения  $\rho_0(h)$  напряжение подводилось к крайним электродам, после чего измерялась  $\Delta\varphi(h)$  — разность потенциалов между нижним электродом и электродами, расположенными эквидистантно по высоте трубки. Зная  $\Delta\varphi(h)$ , величину тока, протекающего по трубке, площадь сечения трубки и расстояние между соседними электродами, можно найти  $\rho_0(h)$  — удельное электросопротивление участка породы на высоте  $h$ .

Эксперимент по электрообработке песчано-глинистой породы состоял из двух этапов. На первом в течение 5—15 сут (в зависимости от породы) в трубке осуществлялась фильтрация раствора до установления стационарного режима фильтрации. По результатам измерения расхода жидкости при постоянном градиенте давления в трубке измерялся  $K$  — коэффициент проницаемости среды, а также  $\rho_{00}(h)$  — удельное сопротивление участков породы при полном насыщении образца жидкостью. На втором этапе поток жидкости через трубку прекращался до установления стационарного распределения насыщенности, измерялась  $\rho_0(h)$ , определялась ФПРК. Затем вновь пропускалась жидкость через трубку и проверялась стабильность  $K$ .

Для электрообработки полностью насыщенной породы напряжение подводилось к крайним электродам



Р и с. 1

Таблица 1

Тип поро- ды	Размер зерна, мм					
	≥2,5	1,5	0,63	0,315	0,16	<0,16
	Доля от общей массы, %					
I	0,04	0,13	1,85	31,8	44,3	21,8
II	0,02	0,20	3,15	24,0	36,6	36,0

Таблица 2

Тип поро- ды	$d$ , мкм	$D$ , мкм	$G$ , %	$K$ , мкм <sup>2</sup>	$m$ , %
I	203	117	11,1	0,313	23,1
II	186	122	14,5	0,119	22,3

из мелкой сетки, выполненным из нержавеющей стали. После электрообработки измерялись  $K$ ,  $\rho_{30}(h)$  и восстанавливалась ФПРК. В течение всего эксперимента проводились измерения  $K$  на контрольной трубке, которая электрообработке не подвергалась.

Исследовались песчано-глинистые породы, для которых первоначально определялся их фракционный состав (табл. 1, за вычетом массы глины, для двух типов породы). В табл. 2  $d$  — средний размер зерна,  $D$  — дисперсия зерен по их размерам,  $G$  — доля глины в общей массе,  $K_0$  — первоначальная проницаемость,  $m$  — пористость.

На рис. 2, 3 представлены результаты измерения  $\rho_3(h)/\rho_{30}(h)$ , где  $\rho_{30}(h)$  — удельное сопротивление тех же участков при полном насыщении образца жидкостью соответственно для I и II типов песчано-глинистой породы, отличающихся видом ФПРК, сплошные линии — результаты, полученные до электрообработки, штриховые — после нее. Для первого типа пород электрообработка продолжалась 2,5 ч при напряженности поля  $E = 14,2$  В/см, плотность тока  $j = 3,3$  мА/см<sup>2</sup>. В результате электрообработки проницаемость увеличилась в 1,87 раза. Для второго типа при той же продолжительности электрообработки  $E = 6,5$  В/см,  $j = 0,7$  мА/см<sup>2</sup>. Проницаемость увеличилась на 13%. В том и другом случае температура поверхности трубок в процессе электрообработки менялась незначительно.

На рис. 4 представлены результаты восстановления ФПРК для первого типа породы, на рис. 5 — для второго. Сплошная кривая — ФПРК до обработки, штриховая — после электрообработки. Видно, что электрообработка приводит к изменению ФПРК. При этом происходит увеличение среднего радиуса капилляров и уменьшение доли относительно тонких капилляров. В первом случае средний радиус  $R$  увеличивается от 18,0 до 19,7 мкм, во втором — от 13,5 до 16,3 мкм. Соответственно величина  $\sqrt{\langle(r-R)^2\rangle}$  менялась от 11,0 до 13,0 мкм в первом случае и от 5,8 до 12,0 мкм во втором.

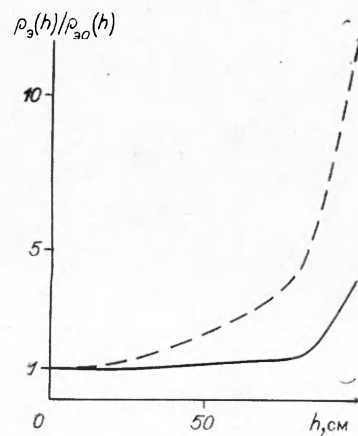


Рис. 2

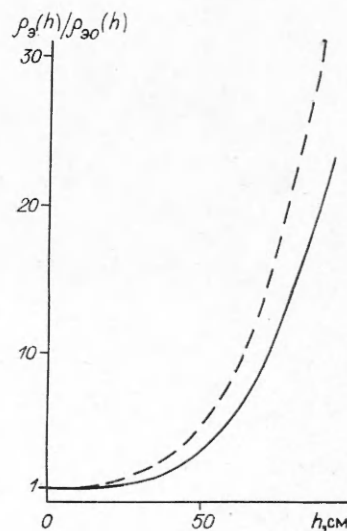
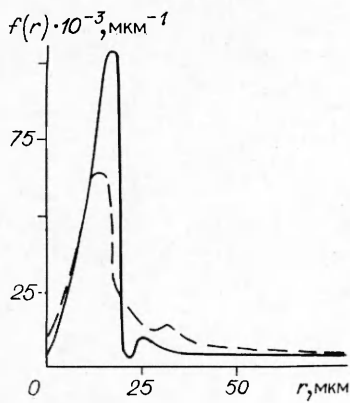
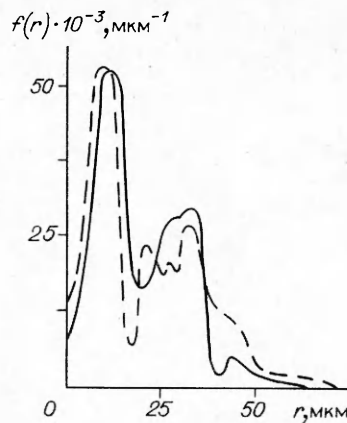


Рис. 3



Р и с. 4



Р и с. 5

Таким образом, экспериментальные данные показывают, что электрообработка приводит к существенному изменению структуры порового пространства среды и увеличению ее проводимости. Необходимо отметить, что изменение проводимости капилляров является квазиобъемным и существенно отличается от случая, когда проводимость среды меняется в результате ее электропробоя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Селяков В. И. Рост трещины в пористой насыщенной среде при пропускании через нее импульса тока // ПМТФ.— 1984.— № 4.
2. Селяков В. И. Изменение проницаемости среды при пропускании через нее электрического тока // VI Всесоюз. съезд по теорет. и прикл. механике: Тез. докл.— Ташкент: Фан, 1986.
3. Селяков В. И. Изменение проводимости неоднородной среды, связанное с пропусканием через нее электрического тока // Численные методы решения задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости.— Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1987.
4. Селяков В. И. Проводимость зернистых и кавернозных сред // Изв. АН СССР. Физика Земли.— 1986.— № 12.
5. Глушко С. П. О восстановлении функции плотности распределения капилляров по размерам // Численные методы решения задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости.— Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1987.

г. Москва

Поступила 15/XII 1988 г.,  
в окончательном варианте — 7/VIII 1989 г.

УДК 532.58

В. А. Городцов

### ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ АСИМПТОТИКА ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЛ В ОДНОРОДНО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ

Анализируется асимптотический вид зависимости от скорости (числа Фруда) потерь энергии (волнового сопротивления) на излучение внутренних волн нелокальными распределениями массовых источников, эквивалентными движущимся телам. Для трехмерных тел, быстро движущихся в безграничной однородно стратифицированной жидкости и в волновом слое конечной глубины, асимптотики оказываются близкими (волновое сопротивление  $R \sim \ln Fr / Fr^2$  и  $R \sim 1 / Fr^2$  соответственно). Причем для малых тел ведущий член асимптотики зависит только от дипольного момента распределений источников, который может подсчитываться в рамках теории однородной жидкости, и пропорционален объему тела.

Для одномерных распределений источников, вытянутых в направлении движения, имеет место «парадокс бесконечного волнового сопротивления». Логарифмически расходящиеся оказываются интеграл по волновым числам в безграничной задаче и ряд по модам в задаче о волноводе из-за логарифмически большого вклада коротких волн (волновых мод с большими номерами).