УДК 550.37: 622.33

Д.И.Рудковский, С.М.Простов

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ МАССИВА МНОГОЭЛЕКТРОДНЫМИ УСТАНОВКАМИ ЭХЗ

Электрохимическое закрепление (ЭХЗ) специальными укрепляющими растворами влагонасыщенных неустойчивых грунтов представляют собой комплекс физических процессов. В частности, при одностадийном ЭХЗ уже на первой стадии воздействия на массив, включающей подачу через электроды раствора «жидкого стекла» с кремнефтористоводородной кислотой, пропускание электрического тока, откачку сдренированной влаги, одновременно происходит целый ряд электрокинетических и гидродинамических явлений (электроосмос, электрофорез, напорная фильтрация, адсорбция, седиментация и др.), наибольшее значение из которых имеет электроосмотическое движение ионов минерализованного раствора в пористой среде под действием электрического поля.

Точное аналитическое решение задач теории ЭХЗ до настоящего времени не реализовано. В наиболее ранних работах расчет электрокинетических процессов сводился к упрощенным одномерным моделям. Например, в работе [1] рассмотрено поступательное движение электролита в капилляре, который в соответствии с представлениями теории диффузионно-адсорбционных полей аналогичен цилиндрическому конденсатору. Рассматривая капиллярно-пористую среду как систему параллельных капилляров, получено следующее решение:

$$V = \frac{\varsigma\,\varepsilon\,S}{4\pi\mu}\frac{U}{\ell} = \frac{\varsigma\,\varepsilon\,\rho_{ж}}{4\pi\mu}, \qquad (1)$$

где V – скорость фильтрации, м/с; ς – электрокинетический ("дзета") потенциал, В; ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф/м; S – суммарное сечение капилляров пористого тела, м^2; U – падение напряжения на электродах-инъекторах, В; ℓ – расстояние между электродами-инъекторами, м; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с; $\rho_{ж}$ – удельное электросопротивление жидкости, Ом·м.

Данный подход был использован при обосновании параметров процессов электроосмотического водопонижения, а также при разработке технологии низконапорного увлажнения малопроницаемых угольных пластов [2].

В работе [3] рассмотрен расчет поля электроосмотической фильтрации двух жидкостей (вяжущего и природной воды). Решена одномерная задача горизонтальной инъекции вяжущего в водонасыщенный грунт, происходящей вследствие электроосмоса и разности гидравлического напора. В частности, установлены соотношения вязкости и УЭС растворов, при которых наблюдается отставание области инъекции от фронта фильтрации жидкости с образованием зон разряжения. Получены уравнения для расчета продолжительности инъекции при уменьшении давления P от начального до минимального (критического) $P_{к}$, при постоянном давлении $P_{к}$ в плоскости раздела, при увеличении P от $P_{к}$ до пластового давления $P_{в}$.

Электрокинетические эффекты возникают при плоскорадиальном напорном течении тампонажного раствора по плоским трещинам, нормальным к оси нагнетательной скважины. В работе [4] установлена взаимосвязь между функцией радиальной составляющей напряженности фильтрационного электрического поля (E) и градиентом давления P, описываемая уравнением

$$E(r) = \frac{2\varsigma\,\varepsilon\rho_{ж}k_{П}}{\delta^2\mu}\frac{dP}{dr}, \qquad (2)$$

где $k_{П}$ – коэффициент трещинной проницаемости, м^2; δ – раскрытие трещины, м; r – координата.

Зависимость (2) позволяет реализовать способы контроля в реальном масштабе времени изменения давления P нагнетания и скорости фильтрации V по длине потока по параметрам (потенциалу φ и напряженности E) нестационарного фильтрационного электрического поля.

Основным недостатком ранее проведенных аналитических исследований является неучет неоднородности физических полей в межэлектродном пространстве, что существенно снижает точность расчетов. Согласно классическим представлениям, изложенным в работе [5], явление электроосмотической фильтрации обусловлено одновременным действием гидравлического напора и электрического тока. С учетом принципа независимости действия гидромеханических и электрических сил уравнение процесса имеет вид

$$V = -k_{ф}\,grad\,h - k_{э}\,grad\,\varphi = -k_{ф}\,grad\,(h + k\varphi), \qquad (3)$$

где V – эффективная скорость электроосмотической фильтрации, м/с; $k_{ф}$ – коэффициент фильтрации, м/с; h – напор, обусловленный технологическими операциями ЭХЗ, не связанными непосредственно с электрообработкой (нагнетание активной жидкости, откачка поровой влаги, температурные градиенты), м; $k_{э}$ – коэффициент электроосмоса, м^2/В·с; φ – потенциал электрического поля, В; $k = k_{э}/k_{ф}$ – коэффициент электроосмотической активности, м/В.

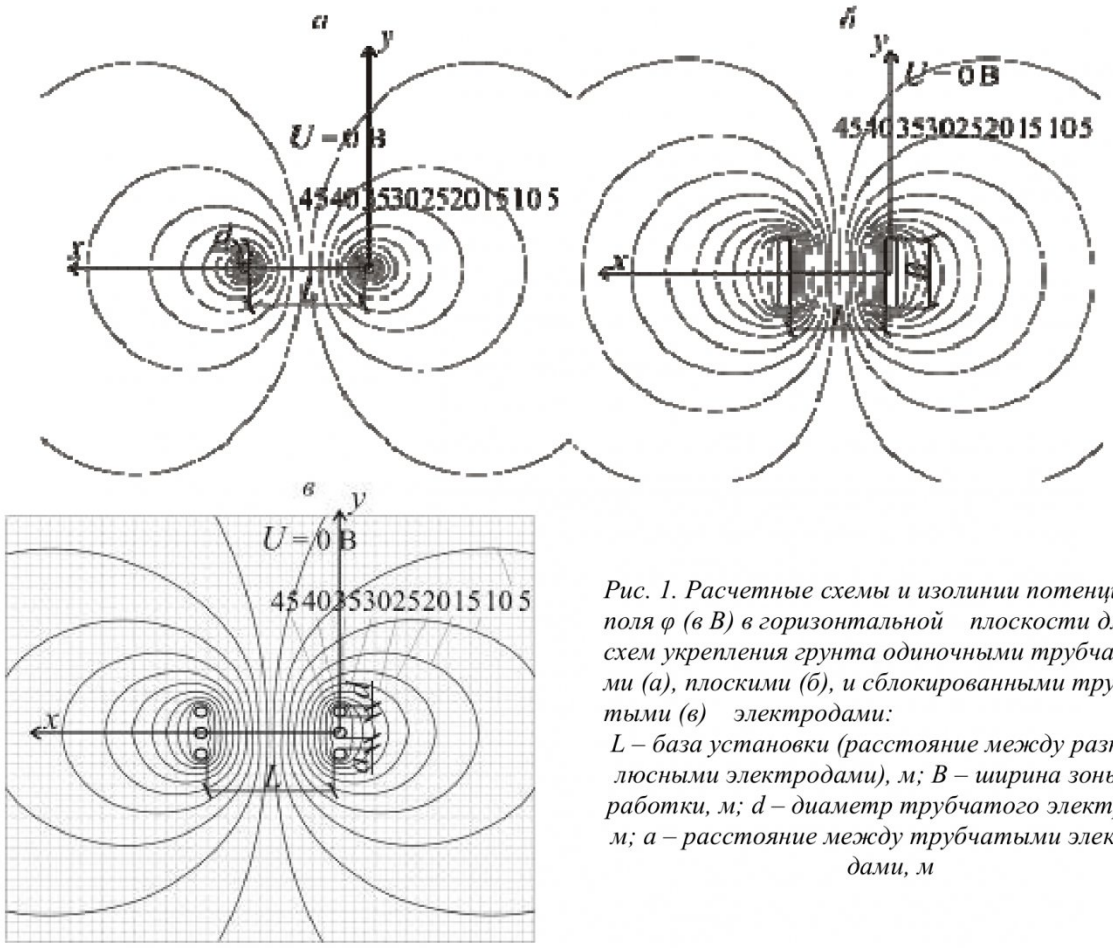

Рис. 1. Расчетные схемы и изолинии потенциала поля φ (в В) в горизонтальной плоскости для схем укрепления грунта одиночными трубчатыми (а), плоскими (б), и сблокированными трубчатыми (в) электродами:
L – база установки (расстояние между разнополюсными электродами), м; B – ширина зоны обработки, м; d – диаметр трубчатого электрода, м; a – расстояние между трубчатыми электродами, м

Считая, что при обработке массива методом ЭХЗ деформации скелета породы пренебрежимо малы ($divV = 0$), среда электрически однородна ($divE = 0$), выражение (3) преобразуется в уравнение Лапласа

$$\Delta(h + k\varphi) = 0. \quad (4)$$

Подчиненность рассматриваемых электроосмотических процессов уравнению (4) позволяет применить для их моделирования метод электрогидродинамических аналогий.

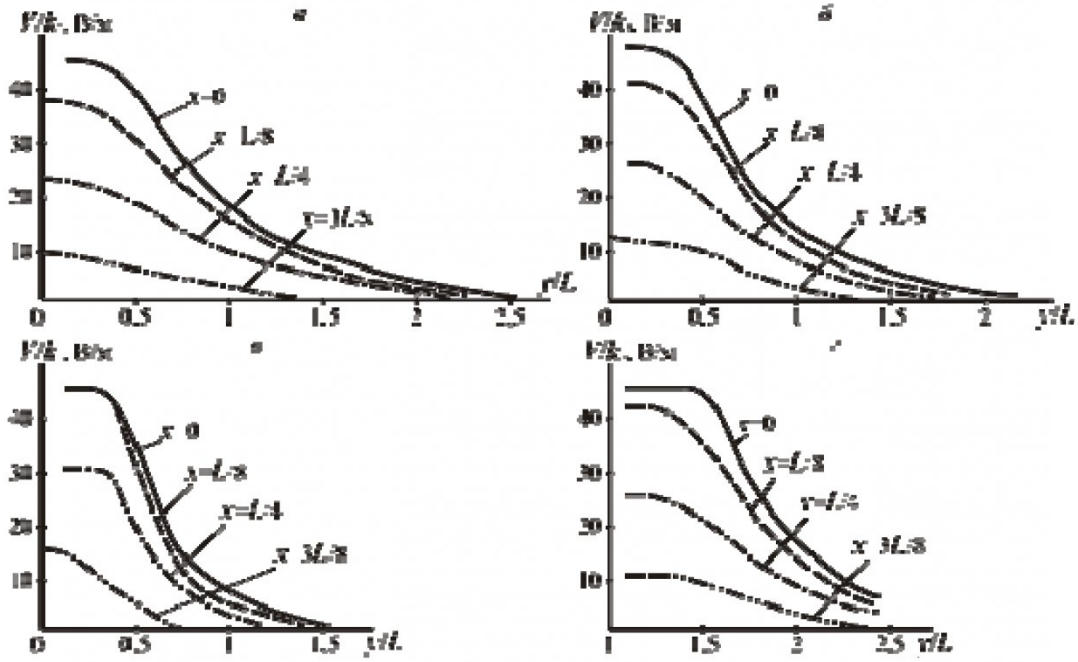

Рис. 2. Изменение относительной скорости фильтрации $V/k_э$ в межэлектродном пространстве плоских электродов при отношении ширины электродов к базе установки B/L = 0,5 (а); B/L = 1 (б); B/L = 2 (в); B/L = 3 (г)

Применение приближенных решений уравнений электростатики, а также компьютерных вычислительных программ позволяет в значительной мере преодолеть проблему моделирования процессов ЭХЗ.

Примером подобного подхода является приведенный в работе [6] расчет электрического поля установок ЭХЗ при рядовом и кольцевом расположении электородов-инъекторов. Использование программ библиотеки MATLAB, реализующих метод конечных элементов, позволило, в частности, установить безопасные по шаговому напряжению размеры зон обработки ЭХЗ на земной поверхности с учетом влияния полости борта карьера и вертикального ствола.

В аналогичной постановке в работе [7] исследовались аномалии электрического поля в пространстве между одиночными электродами-инъекторами по глубине, оси установки и в поперечном направлении. За критерий неоднородности электрического и фильтрационного поля было принято отношение максимальных и минимальных значений напряженности поля (скорости электроосмотической фильтрации) в моделируемом сечении.

В результате исследований установлены закономерности изменения относительной скорости фильтрации на различных расстояниях от основного электрода в горизонтальных, продольных и поперечных вертикальных плоскостях и была выявлена оптимальная глубина установки датчиков для измерения электросопротивления грунта в процессе его электрохимического закрепления.

Полученные ранее результаты свидетельствуют о правомерности используемого подхода и возможности его применения для обоснования технологических параметров ЭХЗ.

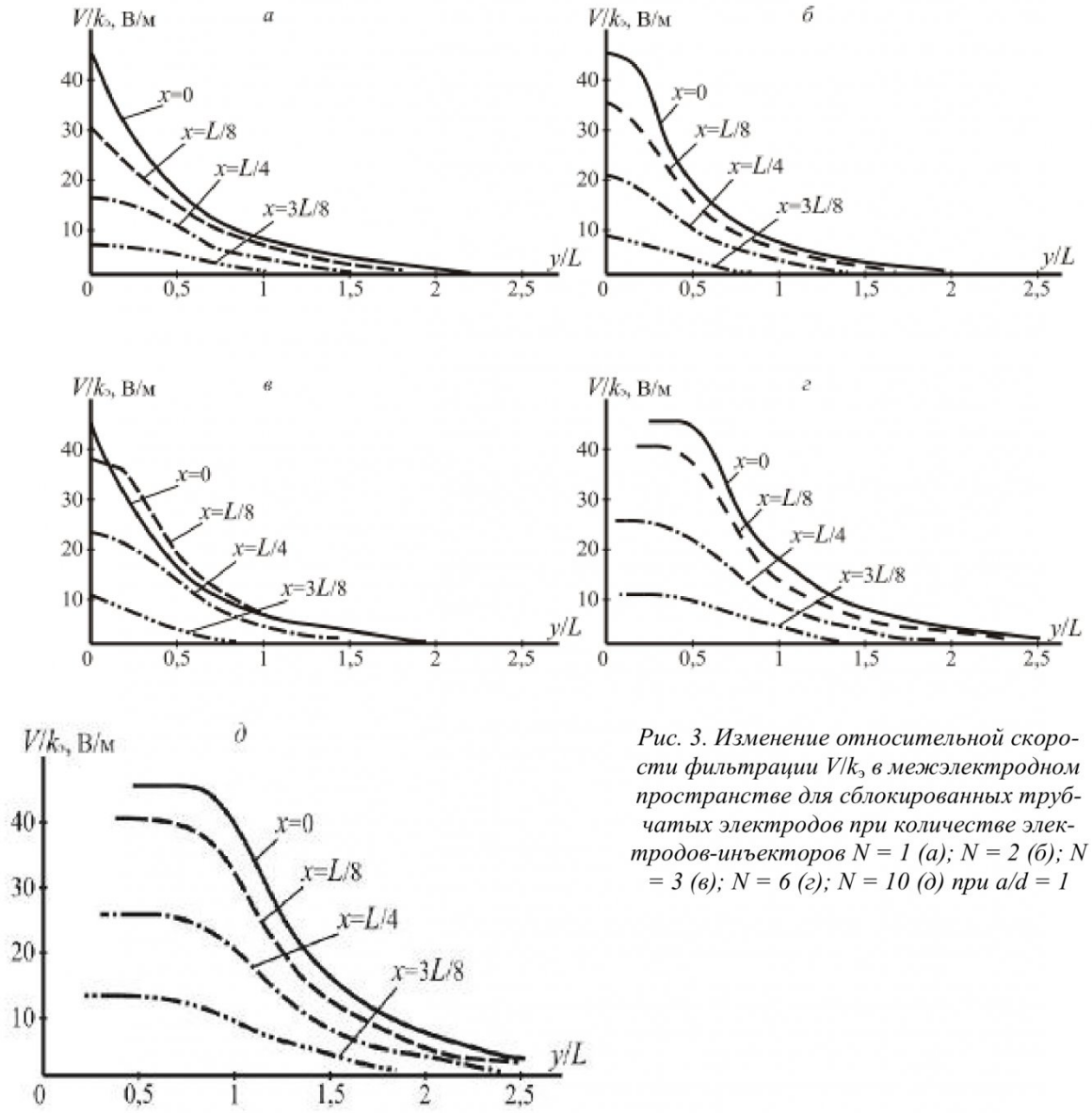

Рис. 3. Изменение относительной скорости фильтрации $V/k_э$ в межэлектродном пространстве для сблокированных трубчатых электродов при количестве электродов-инъекторов N = 1 (а); N = 2 (б); N = 3 (в); N = 6 (г); N = 10 (д) при a/d = 1

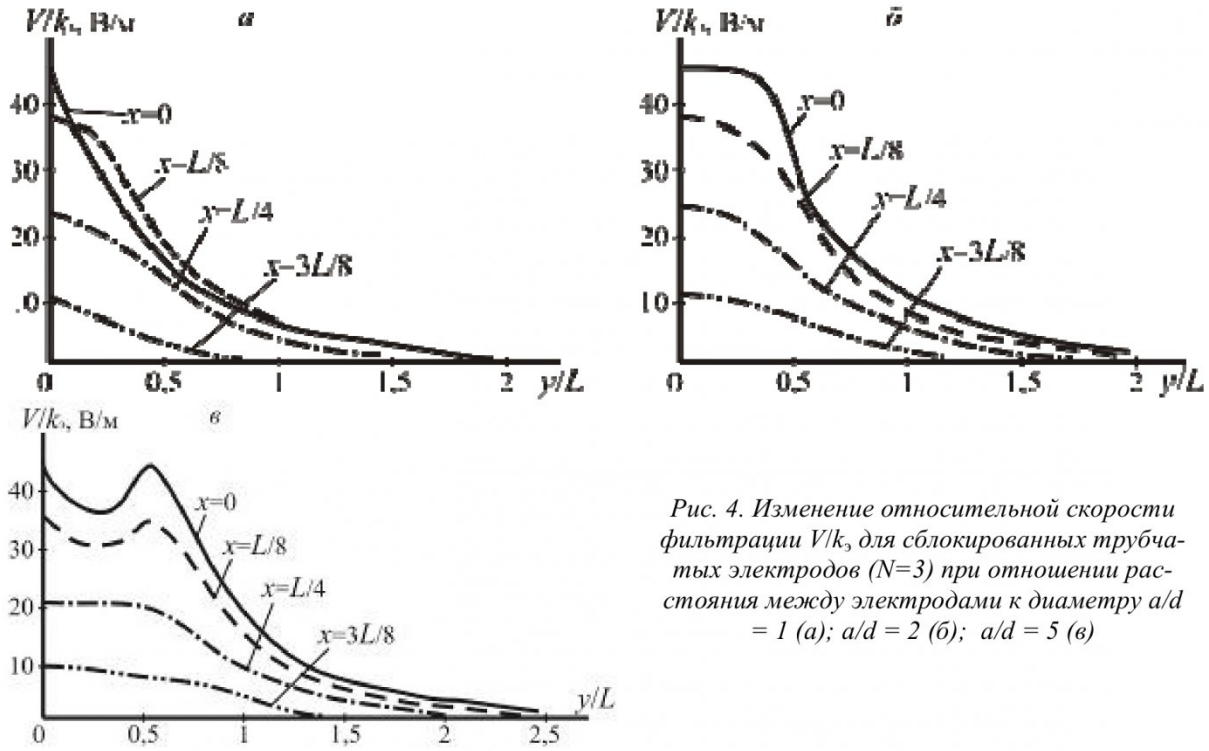

Рис. 4. Изменение относительной скорости фильтрации $V/k_э$ для сблокированных трубчатых электродов (N=3) при отношении расстояния между электродами к диаметру a/d = 1 (а); a/d = 2 (б); a/d = 5 (в)

В частности, интерес представляет изучение объемов жидкости, перемещаемой в результате электроосмотической фильтрации в межэлектродном пространстве многоэлектродных установок ЭХЗ.

Из уравнений (1) и (3) следует:

$$V(x,y) = -\frac{m\varsigma\varepsilon}{4\pi\mu}\operatorname{grad}\varphi(x;y) = k_э E(x;y), \quad (5)$$

где m – пористость; x, y – координаты в горизонтальной плоскости.

Таким образом, по изменению характеристик электрического поля (потенциала φ и напряженности E) можно оценивать интенсивность гидродинамических процессов в любой точке межэлектродного пространства на начальной стадии обработки (насыщение массива укрепляющей жидкостью) в предположении, что физические свойства

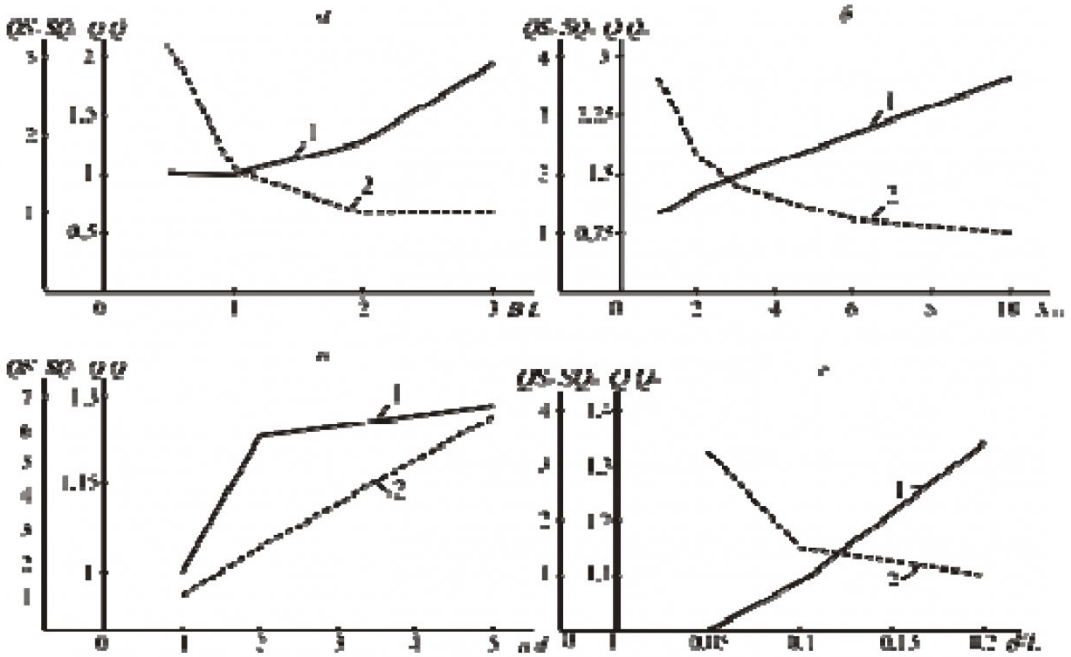

Рис. 5. Графики зависимостей относительных значений расхода укрепляющего раствора Q и удельного расхода Q/S от относительной ширины плоского электрода B/L (а), количества трубчатых электродов-инъекторов N (б), относительного расстояния между трубчатыми электродами-инъекторами a/d (в), относительного диаметра электродов-инъекторов d/L (г): 1 – Q/Q_0; 2 – QS_0/SQ_0

остаются постоянными ($k_э = const$).

При стационарном электроосмотическом движении раствора суммарный объем перемещающейся жидкости можно определить из выражения

$$Q = \int_0^H \int_0^B V(x, y) dz dy \approx H \int_0^B V(x, y) dy, \qquad (6)$$

где H, B – глубина и ширина зоны обработки, м; z – вертикальная координата.

Здесь приведены результаты компьютерного моделирования физических процессов при обработке массива многоэлектродными установками ЭХЗ. Исследование проводилось для трех принципиальных схем расположения электродов: одиночных трубчатых, плоских и сблокированных трубчатых, различающихся площадью рабочей поверхности. Построение изолиний φ (x, y) и E (x, y) производилось с использованием программ библиотеки MATLAB 6.5. Графики изолиний потенциала φ (x, y) при U = ± 45 В в горизонтальной плоскости приведены на рис. 1.

Результаты обработки первичных данных компьютерного моделирования в форме графиков изменения относительной скорости электроосмотической фильтрации в межэлектродном пространстве $V/k_э$ (x, y) при различных технологических параметрах установок ЭХЗ представлены на рис. 2-4.

Для интегральной оценки эффективности обработки массива указанными установками ЭХЗ были определены объемы электроосмотической фильтрации Q (расхода) и удельные расходы Q/S на единицу площади S рабочей поверхности электродов. На рис. 5 приведены графики зависимостей относительных значений Q и Q/S, причем за базовые значения Q_0 и S_0 приняты минимальные зафиксированные значения. Расчеты в соответствии с уравнением (6) проведены методом графического интегрирования.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Для всех многоэлектродных установок ЭХЗ электроосмотическое движение укрепляющего раствора сосредоточено в зоне с шириной в диапазоне y = (0-1,5)L, при этом скорость фильтрации экспоненциально убывает в направлении, перпендикулярном оси установки. Размеры зон электрохимического насыщения и электроосмотического осушения, примыкающие к электродам, составляют x = (0,25-0,35)L.

2. Для плоских электродов-инъекторов с увеличением их ширины в диапазоне B = (1-3)L величина суммарного электроосмотического объема фильтрации Q линейно возрастает, при этом удельный расход на единицу площади рабочей поверхности Q/S экспоненциально снижается.

3. Для трубчатых электродов при их группировании величина Q линейно возрастает с увеличением числа N и диаметра электродов d, экспоненциально возрастает с увеличением отношения расстояния a между электродами к их диаметру d. При этом удельный электроосмотический расход Q/S увеличивается пропорционально отношению a/d и экспоненциально убывает с увеличением параметров N и d.

4. Наиболее интенсивная обработка массива установкой ЭХЗ обеспечивается одиночными плоскими электродами-инъекторами, поскольку их внедрение в массив технически затруднено, следует применять рядовое расположение трубчатых электродов, при этом группирование их при $N > 2$ нецелесообразно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Курденков, Л. И.* К вопросу уплотнения водонасыщенных глинистых грунтов постоянным электрическим током // Закрепление грунтов.– 1957.– №31.– С 12–31.

2 *Елкин, И. С.* Повышение эффективности низконапорного увлажнения угольных пластов / *И. С. Елкин, В. В. Дырдин, В. Н. Михайлов.*– Кемерово: Кузбассвузиздат, 2001.–100 с.

3. *Горбунов, Б. П.* Теоретические исследования инъекции крепителя в водонасыщенные грунты / *Б. П. Горбунов, В. К. Чувелев* // Основания и фундаменты.– 1967.– № 57.– С. 181–192.

4. *Хямяляйнен, В. А.* Геоэлектрический контроль разрушения и инъекционного упрочнения горных пород / *В. А. Хямяляйнен, С. М. Простов, П. С. Сыркин*.– М.: Недра, 1996.– 288 с.

5. *Ломизе, Г. М.* Электроосмотическое водопонижение/ *Г. М. Ломизе, А. В. Нетушил*. – Л. : Госэнергоиздат, 1958.– 176 с.

6. *Простов, С. М.* Геоэлектрический контроль зон укрепления глинистых горных пород / *С. М. Простов, В. А. Хямяляйнен, М. В. Гуцал, С. П. Бахаева*; РАЕН. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005. – 127 с.

7. *Простов, С. М.* Математическое моделирование процессов электрохимической обработки влагонасыщенных глинистых грунтов / *С. М. Простов, А.В. Покатилов, И.В. Щербаков* // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2006. № 3. С. 13–18.

Авторы статьи

Рудковский
Дмитрий Игоревич,
– ассистент каф. строительного производства и экспертизы недвижимости КузГТУ, т. (3842) 58-35-94

Простов
Сергей Михайлович
– докт. техн. наук, проф. каф. теоретической и геотехнической механики КузГТУ, e-mail: raen@kuzstu.ru