

УДК 624.130:504.064.2:550.837.31

Гуцал Максим Владимирович, доцент, к.т.н.
Простов Сергей Михайлович, профессор, д.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)

Gutsal Maxim V, associate professor, candidate of engineering sciences
Prostov Sergey M, professor, doctor of engineering sciences
(KuzSTU, Kemerovo)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

THE DETERMINATION OF THE HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF THE PROCESS OF ELECTROSMOTIC TREATMENT OF CLAYEY SOILS

Аннотация

Приведена косвенная оценка электрических и гидродинамических параметров с использованием результатов физического и компьютерного моделирования зоны электроосмотической обработки глинистых грунтов. Представлен алгоритм расчета электрических и гидродинамических параметров процесса электроосмотической обработки глинистых грунтов.

Abstract

The indirect assessment of electrical and hydrodynamic parameters using the results of the physical and computer simulation of electroosmotic treatment zone of clayey soils is shown. The algorithm for calculating electric and hydrodynamic parameters of the process electroosmotic treatment of clay soils is presented.

Процесс электроосмотической обработки грунтов характеризуется следующими параметрами: коэффициент фильтрации k_f , скорость и коэффициент электроосмоса $k_э$, коэффициент электроосмотической активности ($k_a = k_э/k_f$). Методики определения указанных характеристик зачастую предполагают использование специального лабораторного оборудования, такого как: пробоотборники различной конструкции для забора проб обрабатываемого грунта; фильтрационно-компрессионный прибор, стандартный [1, 2], или адаптированный для электрофильтрации [3]. Исследования, представленные в монографиях [4, 5, 6], также требуют наличия специального лабораторного оборудования, либо уникальных экспериментальных установок и стендов.

Часто с целью детализации полученных данных, получения дополнительной информации, прогнозирования возможных результатов, получения возможности увидеть проблему в развитии исследователи прибегают к математическому моделированию тех или иных этапов физического эксперимента.

В данной работе предлагается методика косвенной оценки указанных выше электро- и гидродинамических параметров с использованием результатов физического [7] и компьютерного моделирования зоны электроосмотической обработки глинистого грунта.

Классическое уравнение электроосмотической фильтрации, представленное в работе [4], имеет следующий вид:

$$\bar{V} = k_{\varphi} \overline{\text{grad}\varphi} + k_{\phi} \overline{\text{grad}h} = k_{\phi} \text{grad}(k_a \varphi + h), \quad (1)$$

где \bar{V} - скорость частиц (ионов); φ - электрический потенциал; h - напор; k_{ϕ} , k_{φ} , k_a - соответственно, коэффициенты фильтрации, электроосмоса и электроосмотической активности.

Следует учесть, что непрерывно меняющиеся электро- и гидродинамические параметры обрабатываемого массива создают определенную трудность в интерпретации экспериментальных данных, вследствие чего аналитическое решение уравнения (1) с достаточной точностью не представляется возможным. Для получения более информативных данных в подобных условиях целесообразно рассматривать нестационарный процесс как череду последовательно сменяющихся друг друга стационарных состояний, иными словами, считать физические процессы, протекающие в зоне обработки между измерениями стационарными.

Для реализации указанного метода разработан программный комплекс, алгоритм которого приведен на рис. 1.

В качестве исходных данных использованы базы данных, приведенные в монографии [7].

Расчет условно разбит на пять этапов (I-V).

На первом этапе определяют размеры характерных зон, формирующихся в процессе электроосмотической обработки грунта.

На рис. 2 представлены графики относительного удельного электросопротивления ($УЭС$) $\rho(x, I \cdot t)$, где x – координата по оси установки, I – ток, t – время, принятые за исходную базу экспериментальных данных, и границы основных зон электроосмоса (осушения и скопления влаги).

На втором этапе производят расчет принимаемой за эталон начальной скорости электроосмоса V_0 . На рис. 3 приведены данные по выходу жидкости Q из электрода-инъектора, послужившие исходными к расчету.

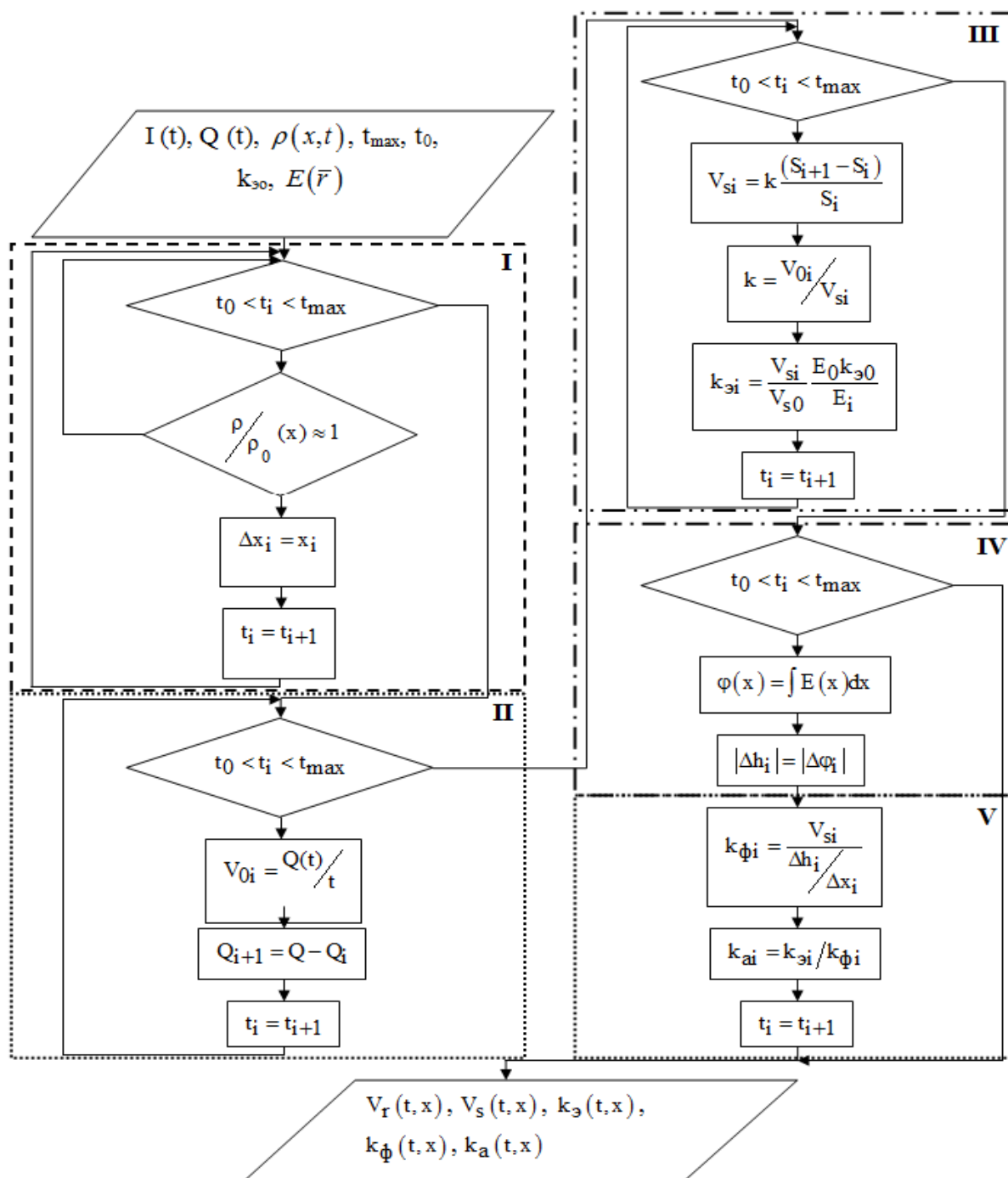


Рис. 1. Алгоритм расчета параметров процесса электроосмотической обработки грунтов (I -V – этапы расчета):

$Q(t)$ - данные по расходу тока и выходу жидкости, соответственно; $\rho(x,t)$ - данные по изменению относительного УЭС; t_{max}, t_0 – время последнего и первого замера, соответственно; $k_{\varepsilon 0}$ – начальное значение коэффициента электроосмоса; $E(\bar{r})$ – полученные в результате моделирования данные об изменении напряженности электрического поля; V_{si} - скорость изменения процесса, определяемая по графикам $\rho(x,t)$; V_{ri} - скорость протекания процесса электроосмоса, определяемая по графикам $Q(t)$

На рис. 4 приведены результаты расчета относительной скорости электроосмоса $V/V_0(t, x)$.

На третьем этапе определяют скорость изменения процесса электроосмоса, принимая за характеристику этого изменения разницу площадей под графиками УЭС $\rho(\bar{r})$:

$$V_{si} = K_1 \frac{(S_{i+1} - S_i)}{S_i}, \quad (2)$$

где S_i и S_{i+1} - площади под графиками УЭС, соответствующие предыдущему и последующему моменту замера; K_1 - корректирующий коэффициент, определяемый из сравнения начальной скорости V_0 , принятой за эталон, и скорости, рассчитанной по формуле (2) без учета корректировки.

На третьем этапе проводят расчет электрического поля установки с использованием программ реализующих метод конечных элементов раздела PDE библиотеки MATLAB.

При этом задание в модели неоднородности реализовано с учетом следующих допущений:

- исходный массив имел относительную диэлектрическую проницаемость ($\epsilon = 27$), соответствующую значению, принятому для влажной глины;

- в ходе обработки формируются указанные выше характерные зоны с величиной ϵ , соответствующей глине влажной, увлажненной и сухой ($\epsilon = 27, 18$ и 7);

- размеры компьютерной модели и режим обработки соответствовали физической модели [7], а размеры трех зон изменяли в соответствии с данными, полученными на первом этапе.

На рис. 5 приведены графики напряженности электрического поля в поперечной горизонтальной плоскости, расположенной в среднем сечении погруженных электродов-инъекторов.

На последующих этапах, приняв, в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [8], начальное значение $k_3 = 1,3 \cdot 10^{-4}$ см²/В·с, а также учитывая средние значения относительной скорости фильтрации по зонам, рассчитаны зависимости электроосмотических и гидродинамических параметров k_ϕ , k_3 , k_a для каждой зоны с течением времени (рис 6).

На рис. 7, а представлена диаграмма изменения УЭС в катодной области. В целом можно отметить, что при электроосмосе зона увеличения УЭС развивается относительно равномерно во всех направлениях.

С учетом предложенной методики рассчитаны коэффициенты k_3 , k_ϕ , k_a в прикатодной зоне (рис. 6, б, в и г соответственно).

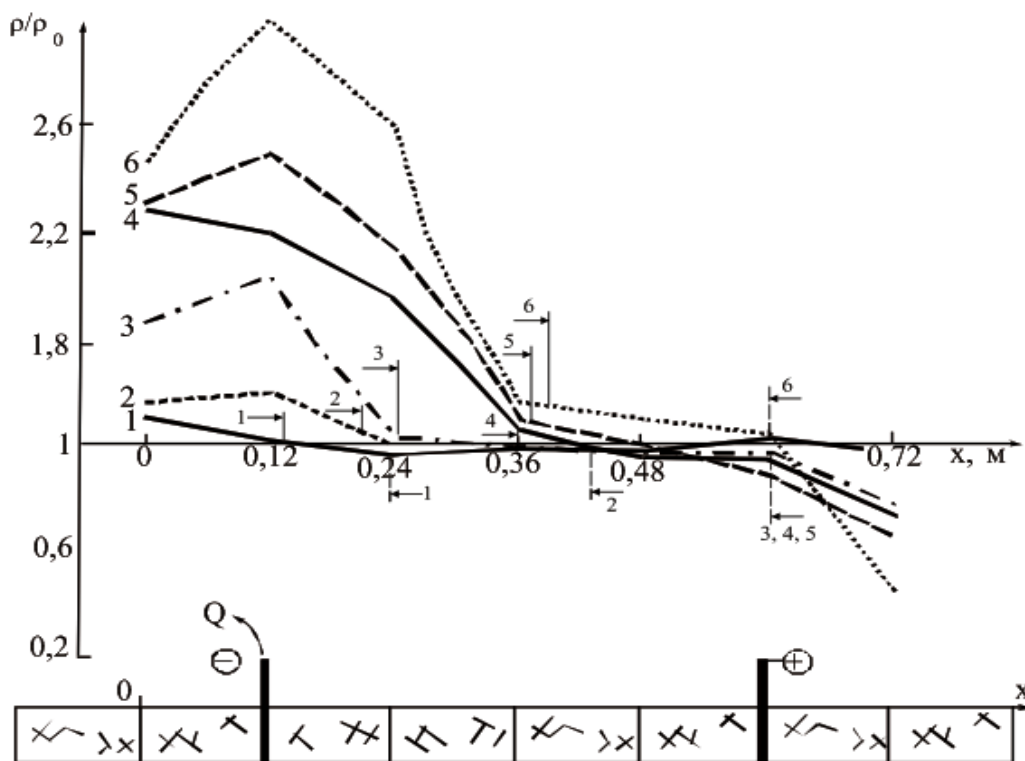


Рис. 2. Зависимость относительного УЭС ρ/ρ_0 от $I \cdot t$ и координаты установки датчика x в зоне электроосмотической обработки:

1 – $I \cdot t = 5,6$ А·ч; 2 – 8; 3 – 18; 4 – 22; 5 – 30; 6 – 54

→ - граница зоны осушения; ← - граница зоны скопления влаги

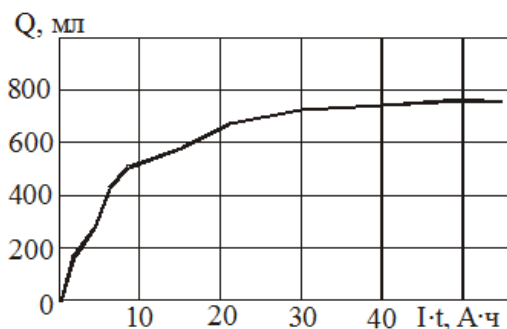


Рис. 3. Выход Q грунтовой жидкости

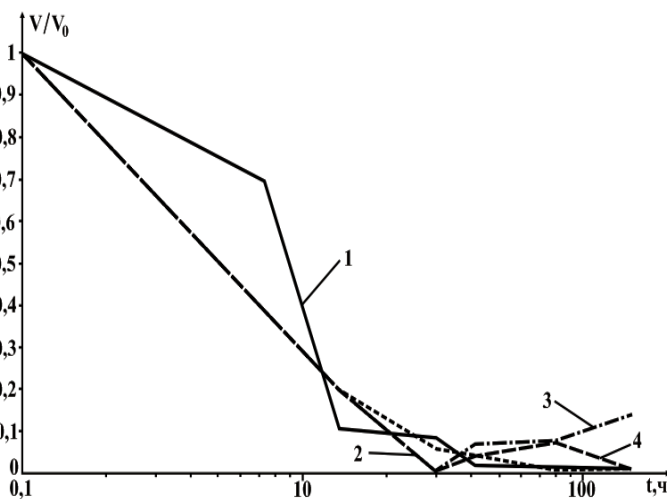


Рис. 4. Изменение относительной скорости электроосмоса

1 – скорость, рассчитанная по выходу жидкости; 2, 3 и 4 – расчетная скорость в, соответственно, зоне осушения, промежуточной зоне и зоне накопления влаги

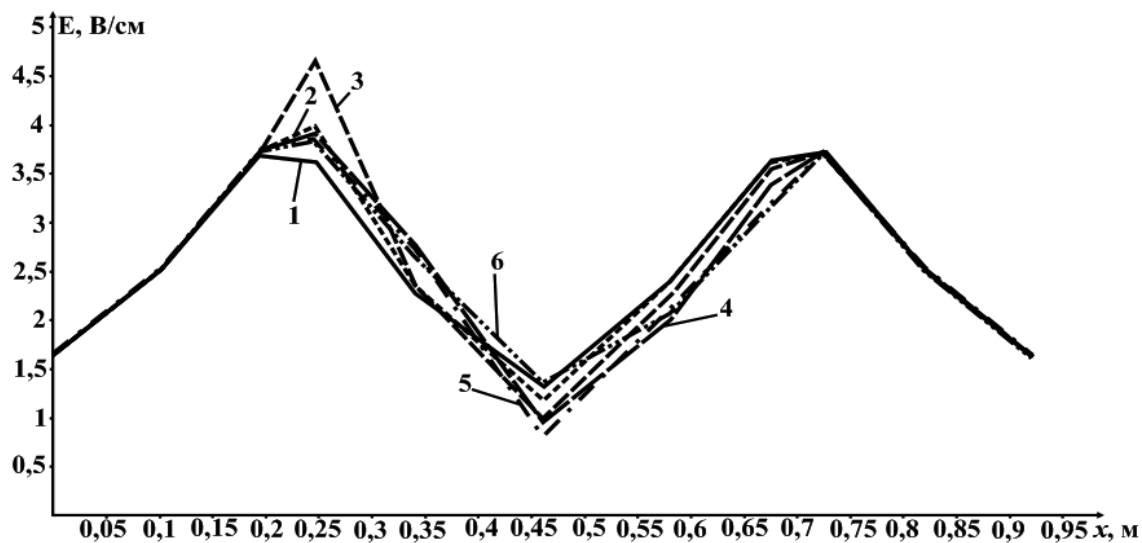


Рис. 5. Изменение напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве с течением времени при глубине $z = 0,125$ м:
 1 – 5,6 Ач; 2 – 8 Ач; 3 – 18 Ач; 4 – 22 Ач; 5 – 30 ч; 6 – 54 Ач

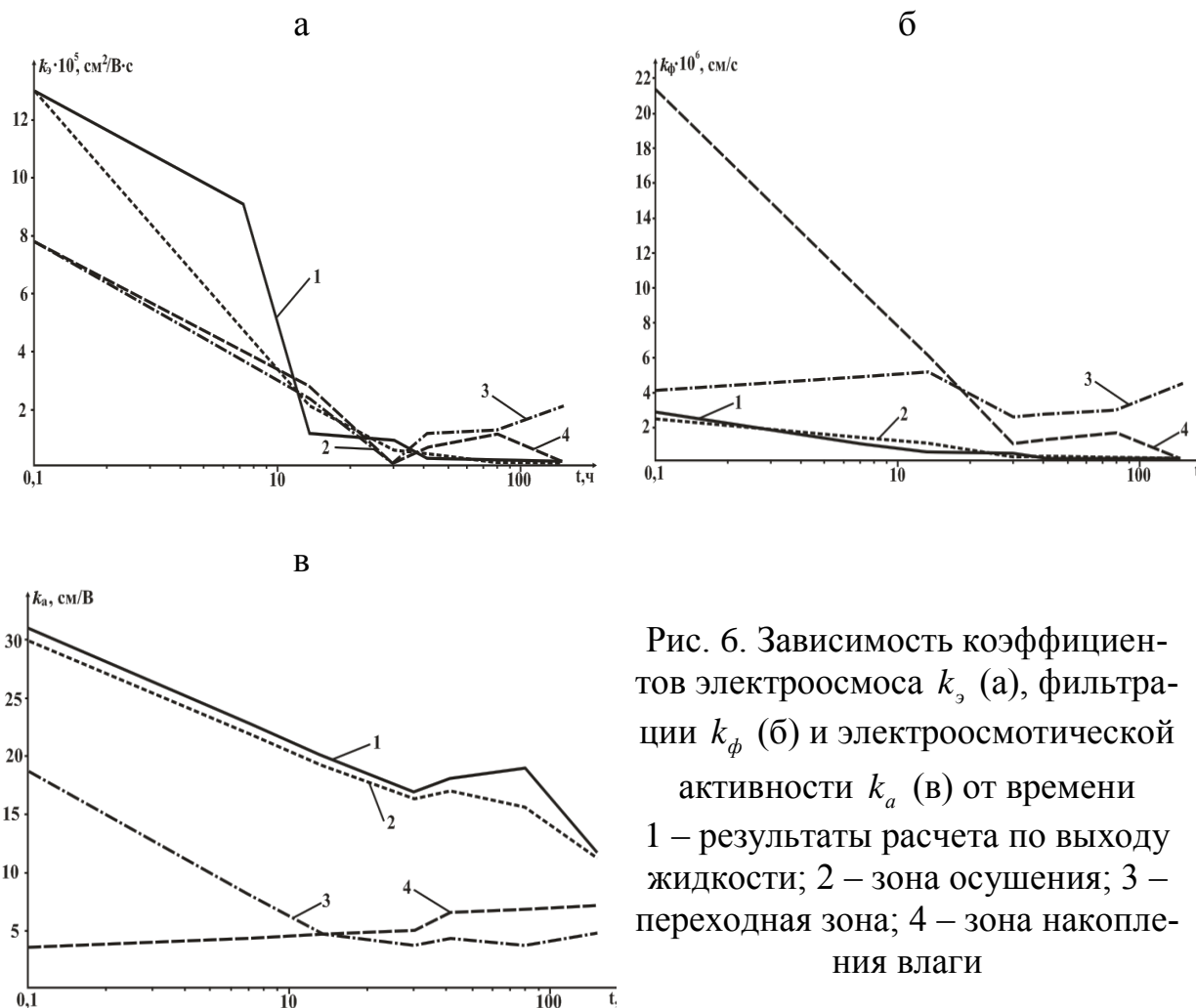


Рис. 6. Зависимость коэффициентов электроосмоса k_s (а), фильтрации k_ϕ (б) и электроосмотической активности k_a (в) от времени
 1 – результаты расчета по выходу жидкости; 2 – зона осушения; 3 – переходная зона; 4 – зона накопления влаги

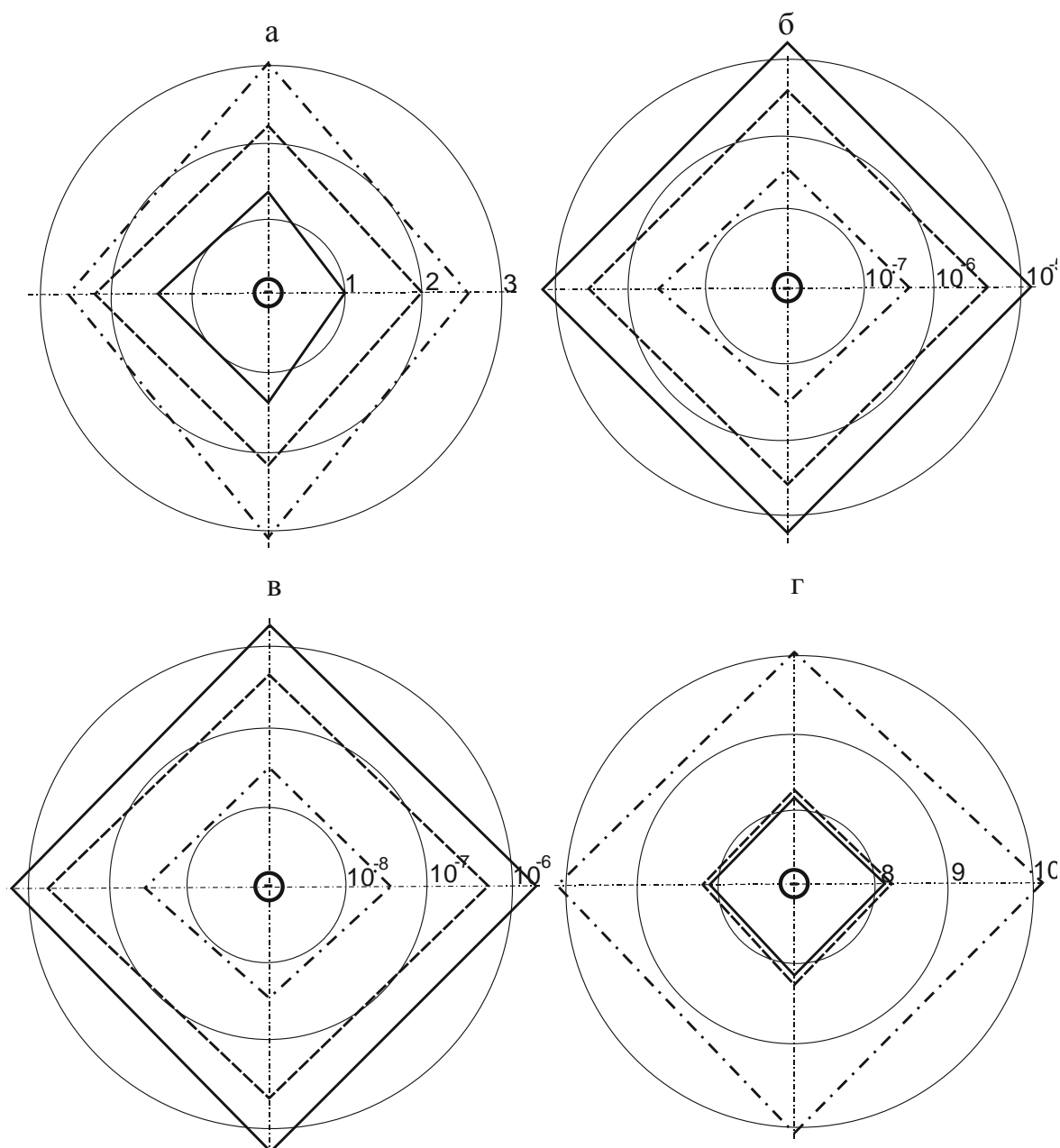


Рис. 7. Диаграммы изменения эффективного УЭС при электроосмосе (а),
 $k_{\text{э}}$ (б), $k_{\text{ф}}$ (в), $k_{\text{а}}$ (г):

——— — $I \cdot t = 8$ Ач; - - - - - — $I \cdot t = 22$ Ач; - · - · - · — $I \cdot t = 54$ Ач

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы.

1. Приведенная методика позволяет моделировать гидродинамические процессы в зоне электроосмотической обработки грунтов по одномерной схеме, в плоскости и в пространстве.

2. Различия в значениях коэффициента электроосмоса $k_{\text{э}}$ для зон увлажнения и осушения незначительны, но, с учетом результатов анализа динамики развития зон, эти значения носят противоположный характер: при осушении величина $k_{\text{э}}$ с течением времени уменьшается, а при накоп-

лении влаги – растёт, что подтверждает характер зависимостей, представленных в работе [6], для глинистых грунтов в диапазоне k_3 до $4 \cdot 10^{-4}$ см²/В·с при влажности до 100%.

3. Расчетные значения коэффициента электроосмоса k_3 с уменьшением среднего значения напряженности электрического поля в диапазоне от 3,8 до 0,8 В/см также уменьшаются в диапазоне от $1,3 \cdot 10^{-4}$ см²/В·с до $1,11 \cdot 10^{-6}$ см²/В·с, что подтверждает результаты, полученные экспериментально и представленные в виде обратной зависимости в работе [6].

4. Полученные в результате расчета значения коэффициента фильтрации k_f в диапазоне 0,005-0,02 м/сут соответствуют диапазону значений от 0,005 до 0,05 м/сут, установленному автором работы [8], который, по сравнению с обычными способами водопонижения, считается наиболее эффективным в области применения электроосмотической обработки грунтов.

5. В зоне активного электроосмоса в процессе откачки воды создается разряжение, перемещение жидкости к электроду происходит относительно равномерно по всем направлениям, что подтверждается равномерным характером изменения электрических и гидродинамических параметров, полученных экспериментально-аналитическим путем (рис. 7).

Список литературы

1. ГОСТ 25584-90. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. – Москва: Изд-во стандартов, 1990. 11 с.
2. ГОСТ 12071-2000. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. – Москва: Минстрой России, 2000. 12 с.
3. Бондаренко, Н.Ф. Физика движения подземных вод. – Ленинград, Гидрометеиздат, 1973. – 215 с.
4. Ломизе, Г. М. Электроосмотическое водопонижение / Г. М. Ломизе, А. В. Нетушил. – Москва: Госэнергетическое изд-во, 1958. – 176 с.
5. Злочевская, Р. И. Электроповерхностные явления в глинистых породах / Р. И. Злочевская, В. А. Королёв - Москва: Изд-во МГУ, 1988. - 177 с.
6. Королёв, В. А. Теория электроповерхностных явлений в грунтах и их применение. — Москва: ООО "Сам полиграфист", 2015. — 468 с.
7. 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.
8. Курденков, Л. И. Область применения электроосмоса в грунтах / Материалы к VI совещанию по закреплению и уплотнению грунтов. – Москва: Изд-во МГУ, 1968. – С. 209–218.