
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

Е.А. Ивлиев*, В.В. Липатов**

ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКИЕ ЗАВЕСЫ В ГРУНТЕ

*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
ул. Лоцманская 3, г. Санкт-Петербург, 190008, Россия

**Foripex OY,
Niskapietiläntie 1425, Purnujarvi, 56640, Finland

Противофильтрационные завесы представляют собой инженерные сооружения, предназначенные для предотвращения движения воды в грунте через какую-либо поверхность. Противофильтрационные завесы используются в основаниях гидротехнических сооружений (плотин), для локализации потенциально опасных источников загрязнений (например, химических заводов), ограждения участков строительных площадок от притока грунтовых вод, обеспечения устойчивости откосов на карьерах и оползневых участках.

Для описания усредненных свойств движения жидкости в грунтах под действием гидравлических сил применяется эмпирический закон Дарси:

$$v_F = k_F E_H, \quad (1)$$

где v_F – скорость фильтрации, м/сут; k_F – коэффициент фильтрации, м/сут; E_H – напорный градиент ($E_H = -\text{grad } H$, H – гидростатический напор, м).

Существующие технологии создания противофильтрационных завес, основанные на нагнетании жидких, в последующем твердеющих растворов через скважины-инъекторы, позволяют решать многочисленные задачи, встречающиеся на практике при коэффициенте фильтрации от 0,5 до 400 м/сут [1]. Для меньших значений коэффициента фильтрации при реализации гидравлических методов возникают трудности принципиального характера. А широко применяемый способ создания противофильтрационных завес путем сооружения траншей, заполненных веществом с низким значением коэффициента фильтрации, ограничен по глубине возможностями экскавации грунта (как правило, не более 7 метров).

При значениях коэффициента фильтрации $k_F \leq 0,5$ м/сут можно использовать электроосмотический метод, основанный на электрической обработке капиллярно-пористых грунтов.

Электроосмос представляет собой движение жидкости в капиллярно-пористой среде под действием внешнего электрического поля. Для описания электроосмотического движения жидкости используется уравнение вида

$$v_E = k_E E, \quad (2)$$

где v_E – скорость движения жидкости, м/сут; k_E – коэффициент электроосмоса, м²/(В·сут); E – напряженность электрического поля, В/м ($E = -\text{grad } U$, U – электрический потенциал, В).

Сравнение (1) и (2) показывает, что между гидравлическими и электроосмотическими явлениями существует формальная аналогия. Отметим, что указанная аналогия справедлива только для электроосмотической пропитки грунтов, при электроосмотическом осушении она отсутствует.

Систематическое изложение теории электроосмотических явлений приведено в [2]. В работе изложены также лабораторные методы исследования капиллярно-пористых материалов (грунтов) и способы измерения различных параметров, в частности коэффициента электроосмоса k_E .

Таблица 1. Основные характеристики работ по электроосмотическому водопонижению и закреплению грунтов

Вид электроосмотической обработки	Характеристики электродов	Электрические характеристики	Характеристики пропи- точных растворов	Удельные затраты	Примечание
Водопонижение при проведении строительных работ [3], [4]	Схема установки электродов – «порядная». Длина – 10–20 м; Диаметр (аноды) – 100 мм Диаметр (катоде) – 150 мм Расстояние между анодными и катодными рядами ≤ 1 м	Электрическое напряжение – 50–100 В Полный ток – 100–1000А	Не применяются	Энергозатраты – 20–30 кВт·час/м ³	Понижается уровень грунтовых вод за счет электроосмотического переноса воды от анодов к катодам и откачки воды из катодов
Закрепление грунтов при сооружении фундаментов зданий [5]	Схема установки электродов - «порядная». Длина – 2–3 м; Диаметр (аноды) – 100 мм Диаметр (катоде) – 150 мм Расстояние между анодными и катодными рядами ≤ 1 м	Электрическое напряжение – 70–80 В Полный ток – 100–200А	Раствор силиката натрия плотностью 1070 кг/м ³ Раствор хлористого кальция плотностью 1160 кг/м ³	Энергозатраты – 10–15 кВт·час/м ³ Силикат натрия – 1,1 кг/м ³ Хлористый кальций – 1,2кг/м ³	Улучшаются параметры грунтов (увеличиваются сопротивление одноосному сжатию и водопроницаемость)
Закрепление грунтов при экскавации горных пород [6], [7]	Схема установки электродов – «кустовая» Длина ≤ 18 м Диаметр (аноды) – 114 мм Диаметр (катоде) – 146 мм Расстояние между анодами и катодом ≤ 5 м	Электрическое напряжение – 540В Полный ток – 300А	Раствор хлористого кальция плотностью 1160кг/м ³	Энергозатраты – 20 кВт·час/м ³ Хлористый кальций – 1,5кг/м ³	Улучшаются механические параметры грунтов (увеличиваются сцепление и угол внутреннего трения)
Укрепление откосов на оползневых участках [8]	Схема установки электродов – «кустовая» Длина ≤ 15 м Диаметр (аноды) – 42–50 мм Диаметр (катоде) – 108–112 мм Расстояние между анодами и катодом ≤ 5 м	Электрическое напряжение – 300 В Полный ток – 100–200А	Раствор силиката натрия плотностью (1050–1100) кг/м ³ Раствор хлористого кальция плотностью 1160кг/м ³	Энергозатраты – 78 кВт·час/м ³ Хлористый кальций – 0,83кг/м ³ Силикат натрия – 1,0–1,5 кг/м ³	Улучшаются механические параметры грунтов (увеличиваются сцепление и угол внутреннего трения)

Электроосмотические противofильтрационные завесы можно разделить на временные и постоянные. В постоянных завесах свойства грунта изменяются необратимо, во временных – низкие фильтрационные свойства сохраняются от нескольких недель до нескольких месяцев.

Электроосмотические противofильтрационные завесы могут создаваться такими методами, как пропитка грунта специальными химическими реагентами, осушение грунта без добавления химических реагентов или комбинацией первого и второго методов. Отметим, что при значениях коэффициента фильтрации $k_f \leq 0,01$ м/сут при электроосмотическом осушении можно добиться необратимых изменений фильтрационных свойств глинистых грунтов, то есть в этих случаях возможно создание долговременной противofильтрационной завесы.

Практические работы по созданию непосредственно противofильтрационных электроосмотических завес в литературе не рассматривались. Однако представляет интерес краткий анализ работ, близких по электроосмотическому водопонижению и закреплению грунтов (табл. 1). Традиционные схемы установки электродов в грунте при выполнении масштабных проектов показаны на рис. 1, где а – «порядная» схема установки анодных и катодных электродов, б – «кустовая» схема установки электродов.

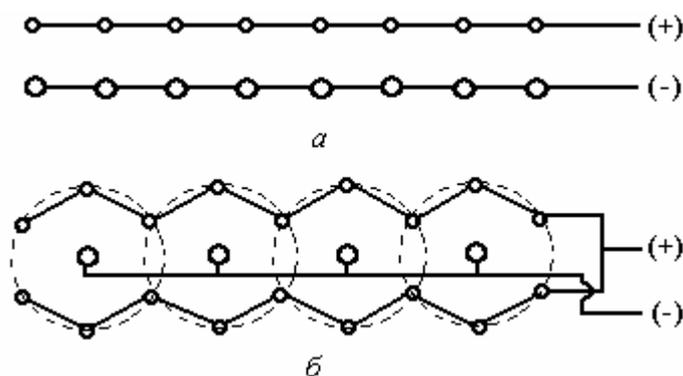


Рис. 1

Необходимо отметить, что при водопонижении изменение параметров грунта обратимо, то есть водопонижение является временной противofильтрационной завесой. При закреплении грунтов ставится цель необратимого улучшения механических характеристик, однако одновременно снижаются коэффициент фильтрации и общий расход жидкости через поперечное сечение закрепляемого грунта, то есть реализуется противofильтрационная завеса, которая создается, как правило, по участкам. Протяженность одного участка ограничивается мощностью источника постоянного тока. В известных работах (табл. 1) на одном участке все аноды и катоды подключаются к полюсам источника постоянного тока одновременно. Однако при этом отсутствуют электроосмотический и гидравлический потоки через плоскости симметрии соседних анодов. Вследствие чего в областях, прилегающих к этим плоскостям, происходит недостаточное снижение коэффициента фильтрации. При этом сплошность завесы может нарушаться.

В патенте [9] предлагается способ создания сплошной электроосмотической завесы. Ее сплошность обеспечивается специальным режимом обработки, который иллюстрируется на рис. 2. Электроосмотическая обработка одного участка осуществляется в две стадии. На каждой стадии к отрицательному полюсу источника постоянного тока подключаются все электроды-катоды и одна из двух групп электродов-анодов, объединяющая все несмежные вдоль контура завесы электроды-аноды. В результате обработки образуются взаимопересекающиеся области грунта с пониженным значением коэффициента фильтрации (рис. 1,б). Энергозатраты на единицу длины завесы не увеличиваются, так как на каждой стадии обрабатывается участок двойной протяженности.

При планировании времени электроосмотической обработки грунтов необходимо учитывать электрохимическое растворение анодов. Потери металла в результате анодного растворения оцениваются по формуле

$$G = D_E I_a t \text{ (кг)}, \quad (3)$$

где I_a – анодный ток, А; D_E – массовый электрохимический эквивалент металла, кг/(А·час) (для железа $D_E = 1,04 \cdot 10^{-3}$, кг/(А·час)); t – время, час.

Наряду с вертикальными противofильтрационными завесами встречаются и горизонтальные или комбинированные вертикально-горизонтальные. В частности, перспективна задача создания

комбинированной завесы в глинистых грунтах для хранения ядовитых отходов. Комбинированная электроосмотическая завеса в таком случае представляет собой по форме «бак»: вертикальная завеса создает «стенки», а горизонтальная – «днище». Технологии создания вертикальных и горизонтальных электроосмотических завес различны.

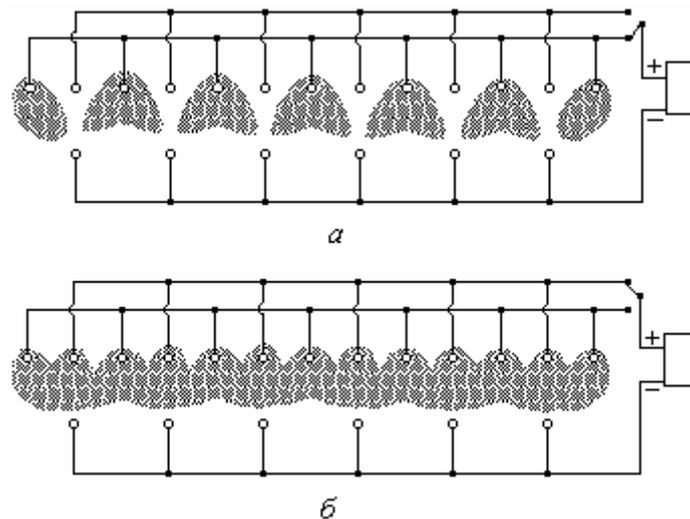


Рис. 2

Горизонтальная электроосмотическая завеса была успешно реализована в рабочей камере канализационного коллектора в Санкт-Петербурге. При сооружении одной из камер шпунт удалось погрузить только на 7 м (при стандартной глубине 12 м), а экскавация грунта должна быть произведена на глубину 6,5 м. Без предварительного закрепления грунта это сделать невозможно, так как на глубине от 4 до 9 м расположен очень мягкопластичный грунт, который при экскавации затекает внутрь камеры как жидкость. Закрепление грунта в диапазоне глубин 5,8–8,3 метра было выполнено методом электроосмотического осушения. Расположение электродов в горизонтальной плоскости показано на рис. 3, где 1 – шпунт; 2 – электроды (80 штук, расстояние между электродами 0,5 м); 3 – кабельное соединение; 4 – источник постоянного тока (мощность – 40 кВт). Расположение электродов в вертикальной плоскости показано на рис. 4, где 1, 2, 3, 4 – то же, что и на рис. 3 – изолированная часть электрода; б – неизолированная, перфорированная часть электрода; 7 – участок грунта, подвергнутый электроосмотической обработке (60 м³), отметкам I, II и III соответствуют глубины 2,3, 5,8 и 8,2 м.

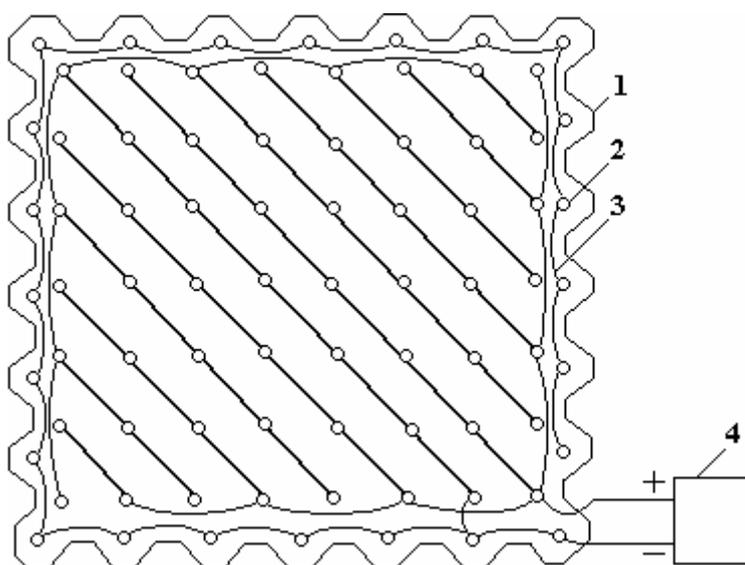


Рис. 3

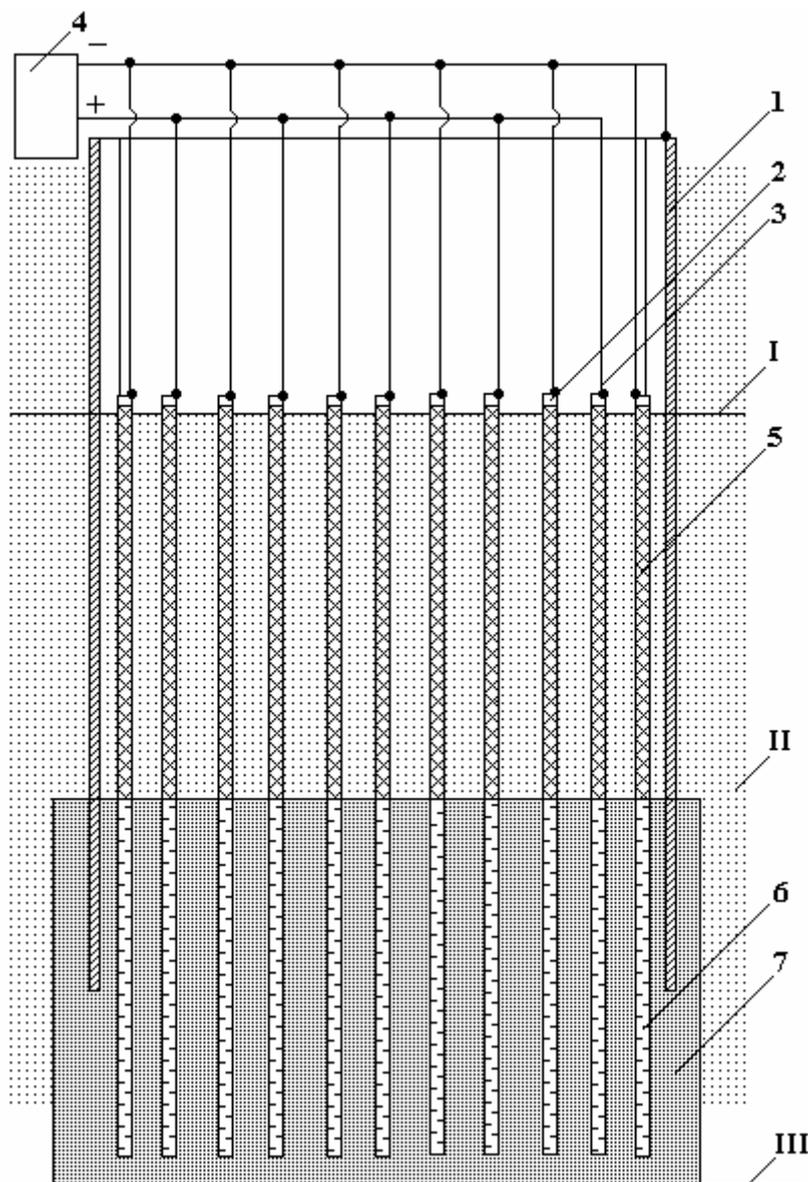


Рис. 4

Электроосмотическое осушение выполнялось в течение 18 дней. Химические добавки не применялись. Для создания сплошной завесы через 9 дней производилась смена полярности анодных и катодных электродов. Вследствие электрохимического растворения электроды потеряли 130 килограммов железа. Из катодных электродов было откачено $7,5 \text{ м}^3$ воды, при этом объемная влажность грунта понизилась с 40 до 20%. Удельные энергозатраты составили $160 \text{ кВт}\cdot\text{час}/\text{м}^3$.

При создании протяженной горизонтальной электроосмотической завесы приближенная оценка основных электрических параметров одного участка выполняется по модели «плоского конденсатора» (рис. 5) (электроды-аноды и электроды-катоды заменяются вертикальными пластинами высотой, равной длине электродов L , и шириной, равной длине секции H).

Вертикальная кольцевая завеса создается с помощью двух рядов электродов, расположенных концентрически (рис. 6) (внутренний ряд – аноды, внешний – катоды). В реальных условиях радиусы окружностей, на которых установлены электроды, значительно больше межэлектродного расстояния $r_a \gg (r_b - r_a)$, тогда оценки основных параметров также выполняются по модели «плоского конденсатора». Такой же вывод можно сделать для вертикальной завесы произвольной формы в горизонтальной плоскости, если поперечные размеры существенно превышают межэлектродное расстояние.

В лабораторных условиях на образцах грунта предварительно определяются исходный коэффициент фильтрации k_{F1} , удельное электрическое сопротивление грунта ρ_1 , коэффициент электроосмоса k_E , начальная W_1 и конечная W_2 влажность грунта после полной электроосмотической обра-

ботки, концентрация пропиточного раствора, которая необходима для максимально возможного снижения коэффициента фильтрации для данного типа грунта (до значения k_{F2}).

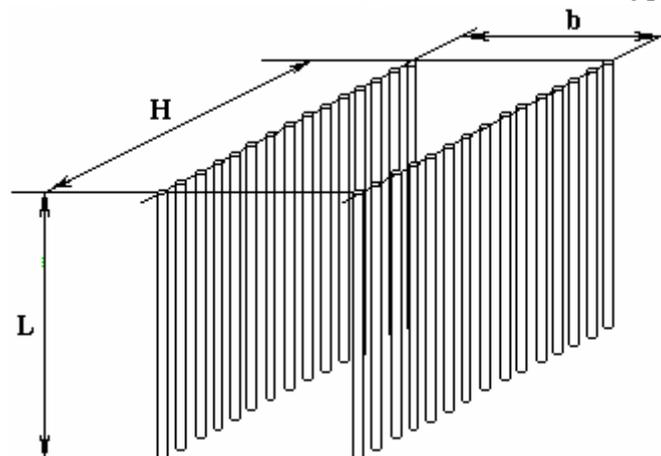


Рис. 5

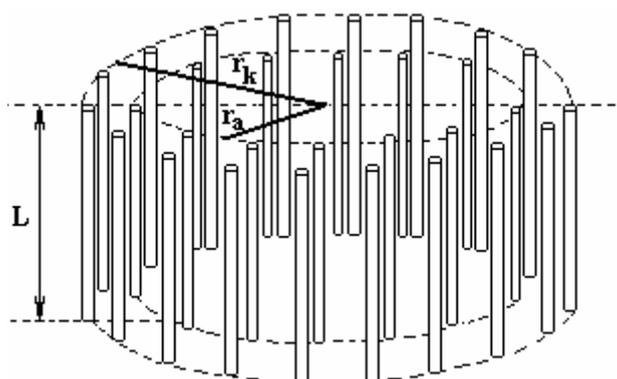


Рис. 6

Если для метода пропитки представить толщину завесы b и время пропитки T , а также сделать допущения о неизменности в процессе обработки коэффициента электроосмоса k_E , температуры и удельного электрического сопротивления грунта, то основные параметры определяются по следующей расчетной схеме.

1. Скорость пропитки грунта

$$v_E = \frac{b}{T} \text{ (м/сут).}$$

2. Напряженность электрического поля

$$E = \frac{v_E}{k_E} \text{ (В/м).}$$

3. Напряжение источника питания

$$U = E \cdot b \text{ (В).}$$

4. Мощность источника питания

$$P = \frac{U^2 L \cdot H}{\rho_1 \cdot b} \text{ (Вт).}$$

5. Потребляемая электроэнергия

$$A = P \cdot T \text{ (кВт·час).}$$

6. Объем пропиточного раствора

$$V_S = b \cdot L \cdot H \cdot \frac{W_1 - W_2}{100\%} \text{ (м}^3\text{).}$$

Для метода осушения в лабораторных условиях дополнительно определяются финальное значение коэффициента фильтрации k_{F2} , допустимое для данного типа грунта после его электроосмотического осушения, и удельное электрическое сопротивление осушенного грунта ρ_2 .

Если задать толщину завесы b , а время осушения T и допустить, что влажность грунта уменьшается, а удельное электрическое сопротивление грунта увеличивается одинаково по всей осушенной зоне, то основные параметры метода осушения определяются в следующей последовательности:

1, 2, 3 и 4 – аналогичны методу пропитки.

5. Сопротивление между анодными и катодными электродами в момент времени t ($0 \leq t \leq T$)

$$R(t) = \frac{[\rho_2 v_E t + \rho_1 (b - v_E t)]}{L H} \quad (\text{Ом}).$$

1. Затраты электроэнергии

$$A = U^2 \int_0^T \frac{dt}{R(t)} = \frac{U^2 L H}{v_E (\rho_2 - \rho_1)} \cdot \ln \frac{v_E \cdot T \cdot (\rho_2 - \rho_1) + \rho_1 b}{\rho_1 b} \quad (\text{кВт}\cdot\text{час}).$$

2. Количество удаленной из катодов воды

$$V_w = b \cdot L \cdot H \cdot \frac{W_1 - W_2}{100\%} \quad (\text{м}^3).$$

В табл. 2 приведены исходные данные и расчетные значения основных параметров метода пропитки для участка завесы длиной $H = 30$ м, глубиной $L = 10$ м и толщиной $b = 1$ м.

В табл. 3 представлены исходные данные и расчетные значения основных параметров метода осушения для аналогичной завесы. Расчетные параметры v_E, E, U, P те же, что и в методе пропитки.

Таблица 2. Основные параметры метода пропитки

k_{F1} , м/сут	k_{F2} , м/сут	k_e , см ² /В·час	ρ_1 , Ом·м	T , сут	v_E , см/час	E , В/м	U , В	P , кВт	A , кВт·час	V_s , м ³
0,5	0,025	0,18	100	30	0,14	78	156	73	52560	45

Таблица 3. Основные параметры метода осушения

W_1 , %	W_2 , %	k_{F1} , м/сут	k_{F2} , м/сут	ρ_1 , Ом·м	ρ_2 , Ом·м	b , м	k_e , см ² /В·час	T , сут	A , кВт·час	V_s , м ³
40	25	0,5	0,05	100	300	1	0,18	60	42130	45

Отметим, что в приведенных примерах в качестве исходных данных можно задавать параметры источника постоянного тока, тогда расчетным параметром будет полное время электроосмотической обработки T .

Приведенные приближенные методы надо считать оценочными. Для обоснованного выбора источника постоянного тока и времени электроосмотической обработки требуется более точный расчет сопротивления растеканию электродной системы и распределения токов между электродами. Формулы для определения этих параметров приведены в Приложении.

Выводы

1. Электроосмотические завесы успешно создаются в грунтах с коэффициентом фильтрации $k_F \leq 0,5$, м/сут, когда традиционные технологии не работают.

2. Электроосмотическая обработка является управляемым процессом, и, изменяя схемы расположения электродов, их количество и размеры, напряжение источника питания, применяя химические добавки, можно изменять время создания завесы и финальный коэффициент фильтрации.

3. Перспектива создания комбинированных вертикально-горизонтальных завес открывает новую уникальную возможность применения электроосмоса в области защиты от загрязнений окружающей среды.

ПРИЛОЖЕНИЕ. Расчет полных токов и сопротивления растеканию в системах анодных и катодных электродов.

Рассмотрим систему из N_1 анодных и N_2 катодных электродов, расположенных в однородном грунте с удельным электрическим сопротивлением ρ . Геометрические параметры системы электродов даны в плане на рис. А1, а и б вертикальной плоскости – на рис. А1, б.

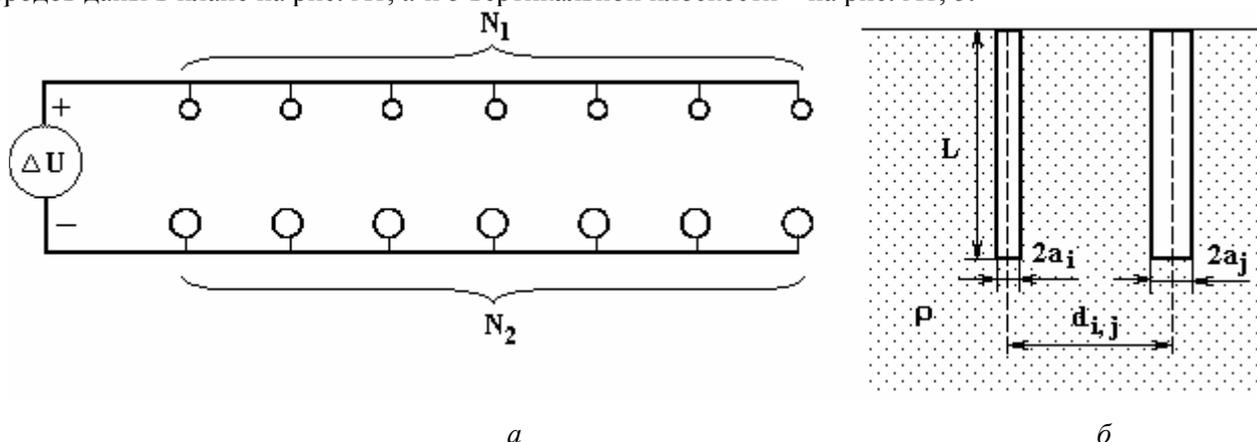


Рис. А1

Вводя сквозную нумерацию электродов ($(j = \overline{1, N_1})$ – аноды, $(j = \overline{N_1 + 1, N})$ – катоды, общее число электродов $N = N_1 + N_2$), связь между потенциалами и токами в такой системе записываем в виде следующей системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N (A_{i,j} - A_{N,j}) \cdot I_j = \Delta U & , \quad i = \overline{1, N_1} \\ \sum_{j=1}^N (A_{i,j} - A_{N,j}) \cdot I_j = 0 & , \quad i = \overline{N_1 + 1, N - 1} \\ \sum_{j=1}^N I_j = 0 \end{cases} \quad (A1)$$

где ΔU – электрическое напряжение между анодной и катодной секциями, $A_{i,j}$ – потенциальные коэффициенты между i -м и j -м электродами.

Таблица А1

Номер анодного электрода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ток анодного электрода, А	8,4	7,1	6,7	6,6	6,6	6,6	6,6	6,7	7,1	8,4
Номер катодного электрода	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ток катодного электрода, А	-8,4	-7,1	-6,7	-6,6	-6,6	-6,6	-6,6	-6,7	-7,1	-8,4

Для электродов в виде протяженных круговых цилиндров потенциальные коэффициенты легко определяются методом средних потенциалов. Например, в случае равных длин электродов выражения для вычисления потенциальных коэффициентов имеют вид

$$A_{i,i} = \frac{\rho}{2\pi L} \left\{ \ln \left(\frac{4L}{a_i} \right) - 1 \right\} \quad \text{при } i = j;$$

$$A_{i,j} = \frac{\rho}{2\pi L} \left\{ \text{Arsh} \left(\frac{2L}{d_{i,j}} \right) + \frac{d_{i,j}}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{d_{i,j}}{2L} \right)^2} \right\} \quad \text{при } i \neq j.$$

Из СЛАУ (A1) можно определить значения полных токов, стекающих с анодных и притекающих к катодным электродам $I_i, (i = \overline{1, N})$, а сопротивление растеканию между анодной и катодной секциями электродов найдется как

$$R_{AK} = \Delta U / \sum_{i=1}^{N_1} I_i. \quad (A2)$$

Сопротивление растеканию между анодными и катодными электродами найдем без предварительного нахождения токов электродов по формуле [10]:

$$R_{AK} = \frac{1}{N_1^2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} A_{i,j} - \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=N_1+1}^N \sum_{j=1}^{N_1} A_{i,j} - \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{j=1}^{N_1} \sum_{i=N_1+1}^N A_{i,j} + \frac{1}{N_2^2} \sum_{j=N_1+1}^N \sum_{i=N_1+1}^N A_{i,j}. \quad (A3)$$

Пример. Выполним расчет полных токов, сопротивления растеканию и срока работоспособности анодных электродов для системы, состоящей из 10 анодных и 10 катодных электродов (рис. A1). Пусть однополярные электроды расположены вдоль одной линии с шагом, равным 1 м, расстояние между анодной и катодной секциями – 2 м (рис. A1). Электроды выполнены из стальных труб длиной 5 м, диаметром – 56 мм, толщиной стенки – 5 мм. Удельное электрическое сопротивление грунта $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Выходное напряжение источника питания – 300 В. Значения полных токов на электродах, найденные из СЛАУ (A1), даны в табл. A1, а значение сопротивления R растеканию, определенное по формуле (A2), равно 4,24 Ом. При этом формула (A3) дает значение $R = 4,26 \text{ Ом}$.

Из данных табл. A1 видно, что наиболее быстро подвергнутся электрокоррозии крайние анодные электроды. Из формулы (3) находим, что эти электроды полностью растворятся через 50 дней. При этом потери железа всей анодной секции за 50 суток составят примерно 84 кг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулеев М.Т., Кутузов Б.Н., Непорожний В.П., Попов А.В. Противофильтрационная завеса Асуанской платины. М.: Энергия, 1970.
2. Тихомолова К.П. Электроосмос. Л.: Химия, 1989.
3. Ломизе Г.М., Нетушил А.В. Электроосмотическое водопонижение. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1958.
4. Schaad W. Praktische Anwendungen der Electroosmose im Gebiete des Grundbaues // Die Bautechnik, V. 35. № 6. 1958, 210–215, № 11. 1958, 420–429.
5. Жинкин Г.Н., Калганов В.Ф. Электрохимическая обработка глинистых грунтов в основаниях сооружений. М.: Стройиздат. 1980.
6. Певзнер М.Е., Валерьянова Л.И., Беленький П.Г. Электрохимическое закрепление грунтов при проведении горной экскавации. Материалы 8-го Всесоюзного совещания по закреплению и уплотнению грунтов. Л.: Энергия. 1971.
7. Певзнер М.Е. Борьба с деформациями горных пород на карьерах. М.: Недра. 1978.
8. Ильин А.И., Гальперин А.М., Стрелков В.И. Управление долговременной стабильностью откосов на карьерах. М.: Недра, 1985.
9. Патент 2050064 РФ. МКИ ⁴ С6 Е02 В3/16 Е02 D3/11. Способ создания противофильтрационной завесы в грунте / Ивлиев Е.А., Иоссель Ю.Я., Липатов В.В. Опул. 10.12.95. Бюл. №34.
10. Ивлиев Е.А. Метод расчета сопротивления растеканию электродных систем // Изв. Вузов СССР, сер. Электромеханика, 1991. № 8. С. 5–6.

Поступила 26.12.05

Summary

The articles handle a problem of creating electroosmotic screens in soil. The contents include application's field, differences from electroosmotic decreasing of water, electroosmotic drying and hardening, schemas location of electrodes and regimes of treatment for guaranteeing of continuousness of screen. Results of creating of horizontal electroosmotic screen are present.