

УДК 550.84.02:502.55

## ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ ГОРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НЕФТЕПРОДУКТАМИ

Шабанов Евгений Анатольевич, ст. преподаватель каф. СПиЭН  
Простов Сергей Михайлович, д.т.н., профессор каф. ТиГМ  
Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева  
ул. Весенняя 28, г. Кемерово, Российская Федерация, 650000  
e-mail: [psm.kem@mail.ru](mailto:psm.kem@mail.ru)

Одним из эффективных методов управления свойствами грунтов, особенно малопроницаемых (с коэффициентом фильтрации  $K_f < 10^{-8}$  м/с) является метод электрообработки, основное воздействие которого на загрязненный грунт сводится к электродеструкции экотоксиканта и электроосмотическом перемещении разбавленного загрязнителя в зону механического удаления. Экспериментально-теоретические основы электрохимического метода разработаны применительно к решению задач технической мелиорации (осушения) и закрепления неустойчивых влагонасыщенных грунтов. Установлены критерии рационального применения данного метода: отношение коэффициентов электроосмотической активности и фильтрации  $K_o / K_f > 10^7$  и удельное электросопротивление (УЭС)  $\rho < 8$  Ом·м [1-4].

Для контроля степени загрязнения грунтов нефтепродуктами целесообразно использовать зависимость УЭС трехфазной среды от пористости, влажности и УЭС порового заполнителя (1), используемую в электроразведке и включающую структурно-текстурные эмпирические параметры [4-7]:

$$\rho_k = \frac{\alpha \cdot K_n}{m^\beta \cdot W^\gamma} \cdot \rho_v \quad (1)$$

где  $m$  – пористость (поровая пустотность);  $W$  – коэффициент влагонасыщения пространства пор и трещин;  $\rho_v$  – УЭС раствора, заполняющего поровое пространство, Ом·м;  $K_n$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – эмпирические параметры, зависящие от структурно-текстурных особенностей исследуемых грунтов (пород);  $K_n$  – параметр, учитывающий поверхностную проводимость глинистого микрослоя на поверхности пор;  $\alpha$  – параметр, зависящий от типа геологического отложения;  $\beta$  – параметр, определяемый структурой порового пространства (в основном извилистостью каналов);  $\gamma$  – параметр, зависящий от смачиваемости раствором поверхности пор.

Диапазоны изменения параметров структуры порового пространства  $\beta = 1,3-2,2$  и смачиваемости  $\gamma = 1,8-3,3$  следует принимать для условий Кузбасса

по ранее установленным экспериментальным данным, а УЭС порового заполнителя рассчитывать по формуле логарифмического средневзвешенного для двухкомпонентной среды.

$$\lg \rho_{\text{в}} = V_{\text{н}} \cdot \lg \rho_{\text{н}} + V_{\text{з}} \cdot \lg \rho_{\text{з}} \quad (2)$$

Экспериментально установлено, что с изменением концентрации водного раствора соли до 6,5 % величина УЭС уменьшается от 80 до 0,2 Ом·м, а УЭС моторных масел и бензина в диапазоне частот  $f = 0-1$  кГц изменяется в диапазоне  $(0,2-1,1) \cdot 10^6$  Ом·м. С использованием экспериментальных и теоретических зависимостей получены расчетные базы данных УЭС заполнителя пор и эффективного УЭС трехкомпонентной среды для указанных диапазонов концентраций водных растворов, частот и соотношения объемных долей нефтепродукта и электролита  $V_{\text{н}} / V_{\text{в}} = 0-20$ .

Для экспериментальной проверки точности расчетных зависимостей и компьютерной программы было проведено сопоставление коэффициентов загрязнения грунта с которым был перемешан фиксированный объем отработанного масла при известной влажности и пористости, которое показало что в диапазоне  $k < 20$  % погрешность оценки не превышала 23 %.

При  $k > 30$  % образец грунта переходил из связного состояния в пластичную несвязную суспензию, вследствие чего величина  $\rho$  и погрешность прогноза резко возрастала. Установлено также, что для повышения точности расчета следует корректировать величину структурного параметра  $\beta$  по установленной нелинейной зависимости при  $\rho_{\text{к}} / \rho_{\text{з}} > 190$ .

На одномерной физической модели цилиндрической формы с плоскими электродами при обработке в однородном электрическом поле подтверждено, что вследствие электрической контрастности водного раствора и нефтезагрязнителя применение микродатчиков УЭС позволяет контролировать перемещение жидкостей в зоне электрообработки. Установлено, что в чистом грунте перемещение природной влаги происходит в сторону анода, вызывая уменьшение уровня УЭС, при наличии в порах нефтепродукта он перемещается в направлении катода, при этом УЭС в точке замера возрастает. Указанные процессы происходят относительно монотонно, их интенсивность во времени зависит от вязкости загрязнителя (масло, мазут, дизельное топливо, бензин). При добавлении в один из электродов растворителя типа Гексан-Н происходит разбавление нефтепродукта, сопровождающееся скачкообразным изменением УЭС, при этом процессы осмотического движения жидкостей усиливаются. Кроме того, зафиксирована общая тенденция к увеличению уровня УЭС, связанная с изменением структурно-текстурных параметров грунта при электрообработке (рис.1).

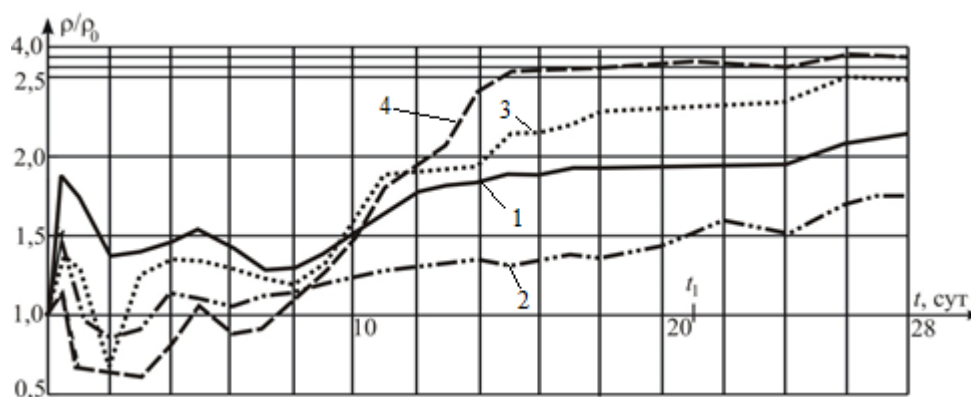


Рис. 1. График изменения относительного УЭС массива при электрохимической очистке от загрязнения мазутом (объем загрязнителя  $V=100\text{г}$ ): 1 – четырехэлектродный датчик-зонд № 1; 2 – № 2; 3 – № 3; 4 – № 4;  $t_1$  – момент прекращения обработки

Исследования образцов грунтов показали, что за счет термического воздействия электрического тока происходит связывание влаги, коагуляция нефтепродукта в порах с увеличением размеров твердых частиц грунта и их слипание. В результате этих процессов зафиксировано снижение влажности во всех точках модели, снижение плотности грунта, а также резкое снижение содержания фракций  $> 0,1$  мм и увеличение содержания более крупных фракций (0,1–2,0 мм) в гранулометрическом составе.

Более точное приближение к натурным условиям дает объемная модель при реальных размерах установки с двумя трубчатыми электродами-инжекторами, с практически применяемыми диапазонами напряжения до 300 В и плотностью тока до  $15 \text{ А/м}^2$ . Объем модели составил  $0,15 \text{ м}^3$ . Установлены количественные диапазоны изменения физико-механических свойств загрязненного грунта: влажность снижается на 15–20 %, а плотность – на 2–10 % как в сухом, так и во влажном состоянии.

В результате коагуляции нефтепродукта на поверхности частиц породы и их слипание происходит уменьшение содержания фракций  $< 0,1$  мм в 2–5 раз, а увеличение содержания фракций 0,1 мм на 30–63 %. Особенно интенсивно процесс изменения гранулометрического состава грунта происходит в прианодной зоне.

Дополнительное введение в электроды-инжекторы активного вещества-растворителя Гексан-Н приводит к разжижению нефтепродукта и его перемешиванию в порах с естественной влагой, что нарушает монотонность процессов изменения УЭС в прикатодной области, где происходит дополнительное скопление жидкого нефтепродукта, и замедляет интенсивность консолидации грунта в прианодной области. особенно резко это проявляется при грунтах, загрязненных более вязким отработанным маслом (рис. 2).

Натурные исследования, проведенные на полигоне ООО «НООЦЕНТР». В целом результаты исследований образцов и измерений микродатчиками УЭС подтвердили результаты лабораторных экспериментов, характеризующие закономерности изменения физических свойств грунтов в прикатодной и

прианодной областях, однако количественно диапазоны изменения свойств изменились, что связано с дополнительным поступлением влаги из прилегающих грунтов и атмосферы. Так, диапазон уменьшения влажности составил 3–6 %, а плотности 3–7 %, содержание частиц с размером  $< 0,1$  мм уменьшилось в зависимости от вида загрязнителя от 1,15 до 1,61 раза (рис. 3). Визуально в результате вскрытия подтверждено формирование уплотненной прианодной зоны и скопления остаточного нефтепродукта.

Георадиолокационное и электрические зондирование проводили по одному продольному и трем поперечным профилям. На радарограммах загрязненные нефтепродуктами участки шириной 2–2,4 м и глубиной до 1,5–1,8 м характеризуются ослаблением горизонтальных линий сифазности. На графиках электропрофилирования (ЭП) и вертикального зондирования (ВЭЗ) данные зоны диагностируются по повышенным значениям эффективного УЭС  $\rho_k$ , при этом величины интегральных значений  $\rho_k$  до, после загрязнения и после обработки составили: для схемы ЭП соответственно 13,1, 21,2, 17,3 Ом·м; для схемы ВЭЗ – 14,1, 22,3, 16,7 Ом·м.

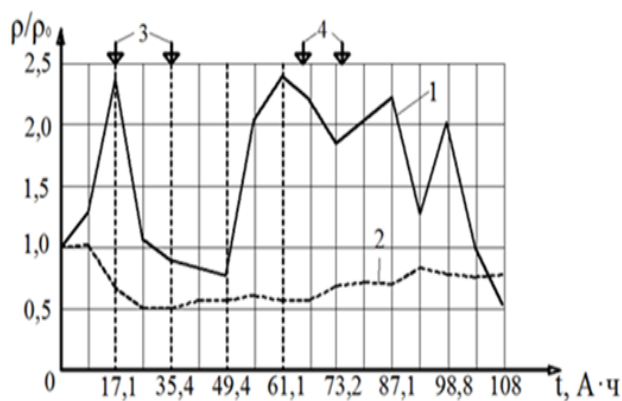


Рис. 2. Изменение УЭС загрязненного отработанным маслом грунта с очисткой растворителем при электрохимической обработке:  
 1 – на датчике № 1 около отрицательного электрода; 2 – на датчике № 8 около положительного электрода; 3 – момент подачи растворителя в положительный электрод; 4 – момент подачи растворителя в отрицательный электрод

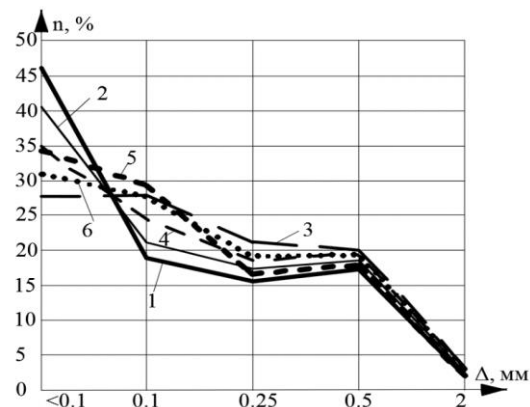


Рис. 3. Изменение гранулометрического состава грунта в зависимости от вида обработки и времени:  
 1 – чистая глина до электрообработки; 2 – чистая глина после электрообработки; 3 – загрязнение отработанным маслом после электрообработки; 4 – загрязнение бензином после электрообработки; 5 – загрязнение отработанным маслом после электрообработки с растворителем; 6 – загрязнение бензином после электрообработки с растворителем

Позонный мониторинг изменений  $\rho_k$ , когда в качестве измерительных использовали электроды-инъекторы, показал, что на интервале времени обработки  $t = 48–72$  ч происходит монотонное снижение  $\rho_k$  в 2–5 раз при всех за-

грязнителях и схемах обработки, обусловленное миграцией и коагуляцией загрязнителя, увеличением пористости, поступлением влаги из прилегающих грунтов и атмосферы (рис. 4).

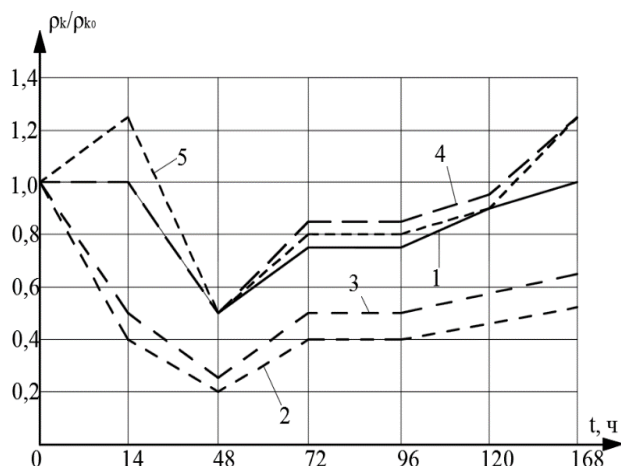


Рис.4. График изменения во времени  $t$  относительного эффективного электросопротивления при электрическом зондировании:

1 – чистый глинистый массив; 2 – загрязненный отработанным маслом массив; 3 – загрязненный бензином массив; 4 – загрязненный отработанным маслом массив с обработкой растворителем; 5 – загрязненный бензином массив с обработкой растворителем

С использованием ранее исследованных регрессивных зависимостей получено, что расчетный коэффициент загрязнения в результате обработки уменьшается от известного начального значения  $k = 7\%$  до 2–3,6 % при загрязнении отработанным маслом и до 2,6–4,5 % – при загрязнении бензином.

### Список литературы

1. Ломизе, Г. М. Электроосмотическое водопонижение / Г. М. Ломизе, А. В. Нетушил. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1958. – 178 с.
2. Страданченко, С. Г. Исследование параметров химического и электрохимического закрепления грунтов / С. Г. Страданченко, П. Н. Должиков, А. А. Шубин. – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2009. – 198 с.
3. Королев, В. А. Очистка грунтов от загрязнений. – Москва : МАИК «Наука / Интерпериодика», 2001. – 365 с.
4. Королев, В. А. Теория электроповерхностных явлений в грунтах и их применение. – Москва : ООО «Сам полиграфист», 2015. – 468 с.
5. Простов, С. М. Электрохимическое закрепление грунтов / С. М. Простов, А. В. Покатилов, Д. И. Рудковский ; РАЕН. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2011. – 294 с.
6. Простов, С. М. Комплексный геолого-геофизический мониторинг процессов упрочнения грунтов / С. М. Простов, О. В. Герасимов, Н. Ю. Никулин. – Томск : Изд-во Томского ун-та, 2015. – 344 с.
7. Вартанов, А. З. Физико-технический контроль и мониторинг при освоении подземного пространства городов / А. З. Вартанов // Москва : из-во «Горная книга». – 2013. – 548 с.