



УДК 544.032.52

## ИСКУССТВЕННАЯ ЛИТИФИКАЦИЯ ВЯЗКОПЛАСТИЧНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ГЕОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В.Ю. Шигаев

*Саратовский государственный университет*

Предложен способ литификации вязкопластичных промышленных отходов. На основании экспериментальных исследований выявлена зависимость упрочнения отходов от силы тока, времени его пропускания и состава коагулянтов.

### Введение

Вязкопластичные промышленные отходы зачастую содержат различные виды химически неуравновешенных токсических и миграционно-активных форм тяжелых металлов, хлорорганических соединений и др., представляющих серьезную угрозу окружающей среде. Предотвращение миграции вредных веществ из отходов, а также устранение или ограничение их влияния является важной и актуальной задачей. Работа в этом направлении ведется многими научными коллективами. В частности, на кафедре геофизики Саратовского государственного университета разработан способ литификации вязкопластичных промышленных отходов [1]. В основе способа лежит активизация геохимических процессов постоянным электрическим током и знание физико-химической сущности упрочнения горных пород, почв и грунтов.

### Физико-химические основы

Основам теории искусственной литификации почв и грунтов посвящены многочисленные публикации Безрука В.М., Воронкевича С.Д., Гончаровой Л.В., Жинкина Г.Н., Королева В.А., Курденкова Л.И., Морозова С.С., Некрасовой М.А., Ржаницина Б.А., Сергеева Е.М., Титкова Н.И., Филатова М.М. и многих других [2, 3, 4, 5 и др.]. По их данным, действие постоянного электрического тока, за счет электрокинетических и электрохимических процессов, активизирует структурообразование в горных породах.

К электрокинетическим процессам, протекающим в грунтах, относятся электрофорез и электро-

осмос. Электроосмотическое перемещение воды в грунте является главным процессом электрохимической обработки глинистых грунтов, он ускоряет и регулирует физико-химические и структурообразующие процессы [2, 5, 6 и др.]. Количество воды, выделяемое при этом, прямо пропорционально силе тока и времени его протекания. Электрофорез представляет собой перенос заряженных частиц и противоионов к соответствующим электродам, сопровождающийся постоянным взаимным обменом противоионов глинистых и коллоидных частиц.

К электрохимическим процессам относятся электролиз, химические процессы и ионообмен. В результате значительно изменяются химико-минералогический состав горных пород, рН дисперсной среды, ускоряются реакции обмена, создаются условия для образования новых химических соединений и коагуляции частиц дисперсной фазы [3, 7, 8].

В случае применения окисляющихся анодов происходит окисление материала электрода, например железа. Ионы железа, взаимодействуя с водой, образуют гидрат закиси железа. Это приводит к повышению концентрации ионов водорода, и в конечном счете, продвижению  $Fe^{2+}$  в направлении катода и коагуляции глинистых частиц.

Введение в грунт через анод коагулирующих добавок, например хлористого кальция, увеличивает содержание в анодной зоне хлористых солей железа, что усиливает процесс растворения электрода, диссоциацию воды, снижает рН грунтового раствора [2]. Кроме того, ионы  $Ca^{2+}$  способствуют агрегации глинистых частиц и образованию труднорастворимых и нерастворимых соединений, цементирующих грунт.

Опытными работами ряда исследователей [2, 3, 7, 8 и др.] установлен факт ступенчатой коагуляции глинистых частиц – от мелких размеров к крупным. Интенсивность коагуляции зависит от кристаллохимических особенностей частиц [7]. Образование гелей и кристаллизация химических веществ приводят к цементации частиц грунта, заполнению пор, трещин и пустот различными цементирующими добавками [2].

## Методика эксперимента

Методика экспериментальных исследований по искусственной литификации вязкопластичных промышленных отходов основана на взаимодействии последних с постоянным электрическим током. Эксперименты проводились в специальной диэлектрической ванне размерами 36×14×5 см. Изучались образцы отходов, отобранных из прудов-накопителей ОАО «Саратоворгсинтез». В качестве электродов использовались алюминиевые пластины. Время пропускания электрического тока, необходимое для получения требуемой твердости литифицируемых отходов, определялось по эмпирической формуле [1]:

$$t = \frac{1}{I} (1 - K),$$

$t$  – время пропускания знакопеременного электрического тока,  $I$  – сила тока,  $K$  – относительный коэффициент механической прочности. Сила тока в ходе работ составляла 0,2 А, напряжение – 240 В.

Измерение механических свойств литифицируемых материалов производилось с помощью прибора Вика, предназначенного для определения времени схватывания тампонажных растворов при цементовании скважин. Глубина погружения иглы прибора является косвенным показателем степени увеличения прочности свойств вязкопластичных промышленных отходов.

## Результаты исследований

В результате проведенных экспериментов во всех образцах было выявлено повышение прочности свойств образцов, подвергшихся воздействию постоянного электрического тока.

Как отмечалось выше, под действием постоянного электрического тока в горных породах происходит ряд сложных физико-химических процессов. Отметим только, что механизм преобразования и перераспределения составляющих элементов горных пород является комплексным.

Эксперимент проводился в несколько этапов. На первом – укрепление велось без введения коагулирующих добавок. На последующих – в прианодную часть экспериментальной установки последовательно вводился 20 %-ные водные растворы хлористого кальция, сульфата железа (III), цетилпиридиний хлорида, расход которых составил  $0,02 \times 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>. Коагулянт вносился

равными долями равномерно: до пропускания электрического тока – один раз и 4 раза – через каждый час электрического воздействия. Общее время литификации во всех случаях, за исключением с цетилпиридинием хлорида, составляло 6 часов, с цетилпиридинием – 7. Замеры механических свойств проводились через 1; 2; 3; 4; 5; 6 и 7 часов соответственно от начала работ. Длительность знакопеременных прямоугольных импульсов составляла 1 час. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 1 и 2.

На рис. 1а приведены графики изменения прочности свойств ( $h_t/h_0$ ) образцов без введения коагулянта в зависимости от относительного удаления от катода  $-l/l_0$ , где  $l_0$  – расстояние между электродами;  $l$  – расстояние от катода до места определения глубины погружения иглы прибора Вика;  $h_0$  – глубина проникновения иглы до пропускания электрического тока;  $h_t$  – то же после пропускания. Анализируя полученные данные, можно увидеть, что прочностные свойства вязкопластичных отходов возрастают с течением времени. Наибольшей твердости литифицируемый материал достигает вблизи электродов, где относительный коэффициент  $h_t/h_0$  за 6 часов пропускания тока достигает 0,35 усл. ед. на катоде ( $l/l_0 = 0,1$ ) и 0,25 единицы на аноде ( $l/l_0 = 1$ ). В средней части установки этот показатель достигает лишь 0,4 усл. ед. Таким образом, за 6 часов эксперимента в приэлектродных частях зафиксирован рост прочностных свойств в 2,8–3,3 раза и в 2,5 раза в средней части установки.

Иначе выглядят результаты последующих экспериментов (рис. 1б и 2). Периодическое введение хлористого кальция в приэлектродные части диэлектрической ванны, а также явления, сопутствующие процессу укрепления, привели к росту прочностных свойств литифицируемого материала (рис. 1б) – в приэлектродных частях ( $l/l_0 = 0,1$ ) в 2,8 раза ( $h_t/h_0 = 0,35$ ), в средней части установки ( $l/l_0 = 0,4 \div 0,7$ ) грунт укрепился наиболее сильно,  $h_t/h_0$  составляет 0,4–0,5 условных единицы при первом часе электрического воздействия и 0,02 по истечении 6 часов (рост прочностных свойств в 50 раз). При этом четко выраженная зона повышенных значений механических свойств постоянно расширяется в сторону электродов и к концу эксперимента занимает 50 % первоначального объема вязкопластичного материала. Отходы полностью потеряли текучесть и приобрели постоянную твердость.

Использование в качестве коагулянта сульфата железа (III) иллюстрируется рис. 2а. Виден рост прочностных свойств в 2,5–4 раза ( $h_t/h_0 = 0,25 \div 0,4$ ) в области электродов ( $l/l_0 = 0,1$ ). При  $l/l_0 = 0,2 \div 0,8$   $h_t/h_0$  достигает 0,25–0,18 относительных единиц.

Литификация с цетилпиридинием хлоридом ведется наиболее эффективно (рис. 2б). Величина  $h_t/h_0$  достигает величины 0,05–0,1 относительных единиц вблизи электродов и 0,05 относительных единиц в центральной части установки при ( $l/l_0 = 0,4 \div 0,8$ ). При этом зона повышенных значений механических свойств (рост в 10–20 раз) захватывает весь литифицируемый объем.

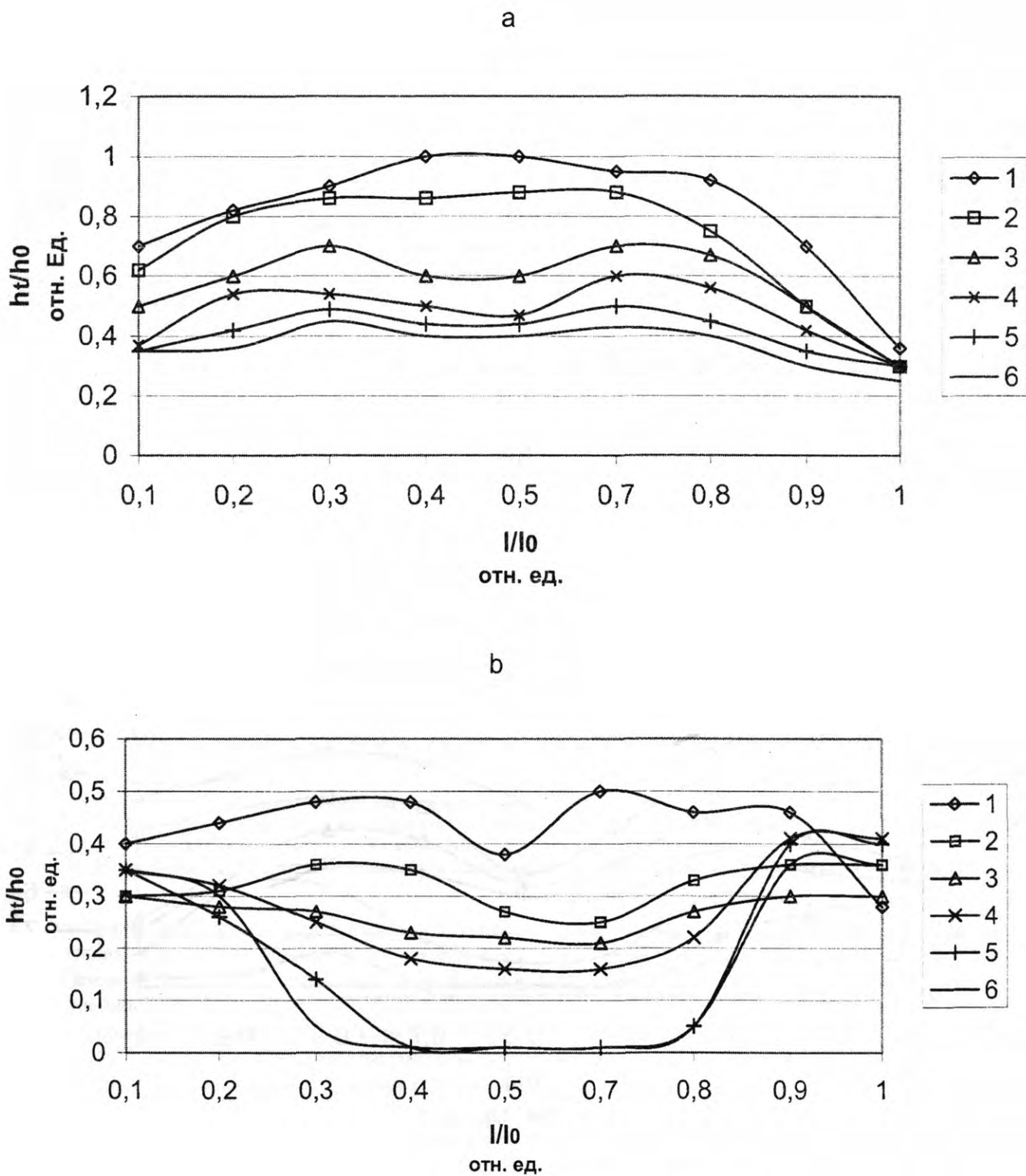


Рис. 1. Графики изменения прочностных свойств. Шифр кривых – время пропускания тока в час:  
 а – графики изменения прочностных свойств образца без введения коагулянта; б – то же с введением хлористого кальция

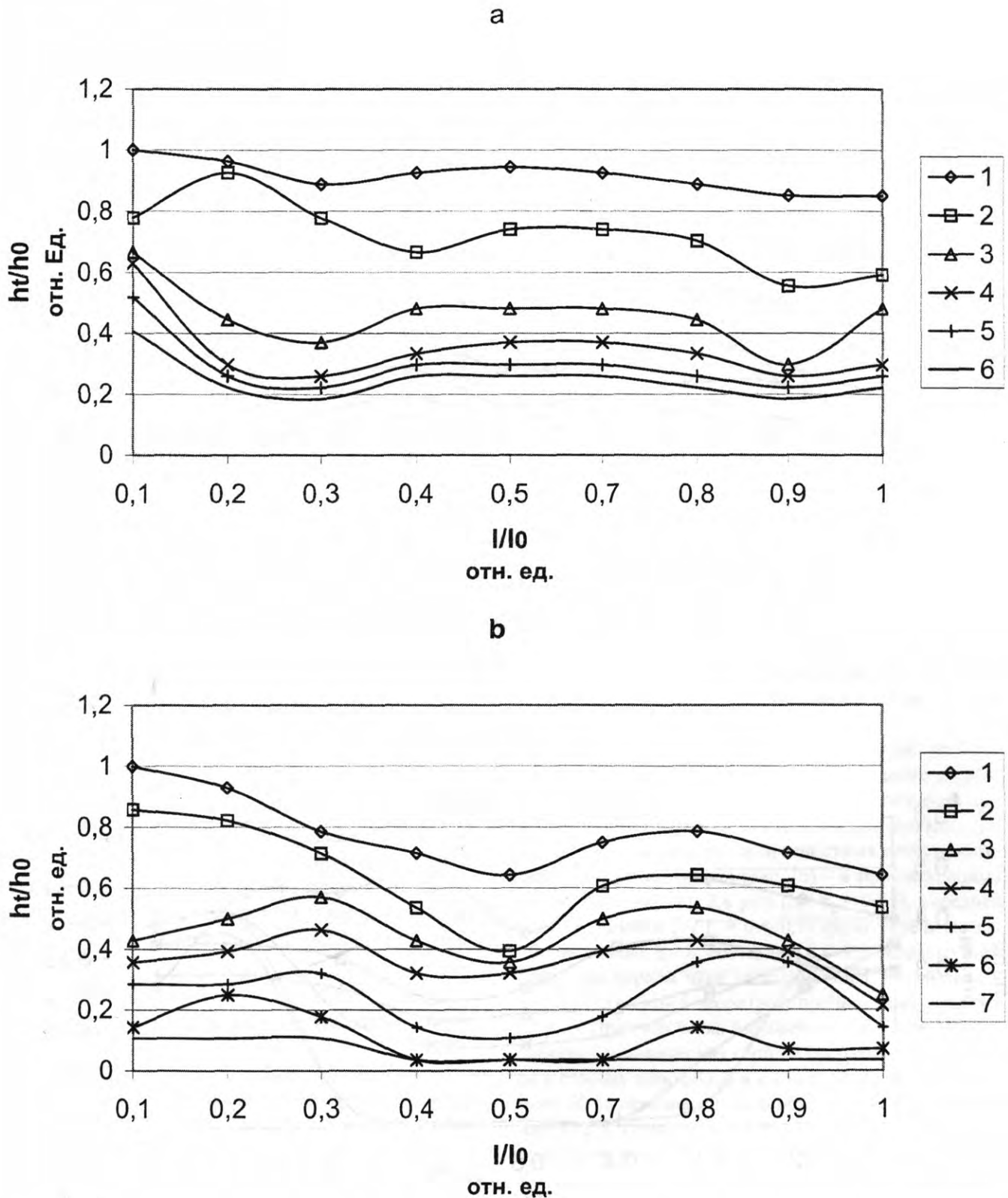


Рис. 2. Графики изменения прочностных свойств с введением коагулянтов. Шифр кривых – время пропускания тока в час:  
 а – графики изменения прочностных свойств образца с введением сульфата железа (III); б – то же с цетилпиридинием хлорида

### ВЫВОДЫ

1. Предложен геоэлектрохимический способ укрепления вязкопластичных промышленных отходов. Разработанная при его создании методика работ поз-

волила установить существенное влияние знакопеременного постоянного электрического тока на геохимические процессы, протекающие в литифицируемых материалах. Активизация этих процессов обеспечивает равномерный по объему массоперенос материалов электродов и коагулирующих добавок.

2. Отмечен ускоренный синтез, искусственно воспроизводящий процесс цементации частиц, чрезвычайно медленно протекающий в естественных условиях.
3. Полученные данные позволяют считать предложенный способ эффективным при искусственной литификации вязкопластичных промышленных отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шигаев, В.Ю. Способ литификации вязкопластичных промышленных отходов : патент на изобретение № 2236314 / В.Ю. Шигаев, Ю.Г. Шигаев, Д.А. Плюсин.

2. Гончарова, Л.В. Основы искусственного улучшения грунтов / Л.В. Гончарова. – М. : Изд-во Моск. гос. ун-та, 1973.

3. Жинкин, Г.Н. Электрохимическое закрепление грунтов в строительстве / Г.Н. Жинкин. – Л.-М. : Стройиздат, 1966.

4. Коржуев, А.С. Электрохимический метод закрепления грунтов / А.С. Коржуев, Н.И. Титков. – М. : Изд-во АН СССР, 1959.

5. Ломизе, Г.М. Электроосмотические процессы в глинистых грунтах и водопонижение при вскрытии котлованов : материалы IV МК МГ и Ф / Г.М. Ломизе, А.В. Нетушил, Б.А. Ржаницин. – М. : Изд-во АН СССР, 1957.

6. Рельтов, Б.Ф. Производственный опыт применения электроосмоса с целью увеличения несущей способности свай – оболочек / Б.Ф. Рельтов, Б.П. Ерыхов // Гидротехническое строительство. – № 2. – 1963.

7. Ржаницин, Б.А. Электрохимическое закрепление грунтов / Б.А. Ржаницин // Гидрогеология и инженерная геология. – № 5. – 1940.

8. Толстопятов, Б.В. К вопросу об электрохимическом закреплении грунтов / Б.В. Толстопятов // Почвоведение. – № 8. – 1940.

УДК 550.837

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОНОХРОМАТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ  
С ПЛОСКИМ СЛОЕМ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЕГО МАТЕРИАЛА**

**Е.П. Кочура, А.В. Скрипкин, С.В. Соболев**

*Курский государственный университет  
Курский государственный технический университет*

Рассмотрено взаимодействие плоской монохроматической электромагнитной волны с однородным электропроводным плоским слоем с целью определения удельной электропроводности его материала. Получено уравнение, которое в неявном виде определяет проводимость через частоту волны, толщину слоя и отношение амплитуд электрического поля на границах слоя. Рассмотрены предельные случаи, позволяющие получить выражение для электропроводности в явном виде.

Основной физической величиной, подлежащей определению при исследованиях структуры верхних слоев Земли с помощью электромагнитных полей как искусственного, так и естественного происхождения, является удельная электропроводность среды (см., например, [1,2,3]). В настоящей работе рассматривается способ определения проводимости образца горной породы в виде плоского слоя, толщина которого существенно меньше его характерных размеров в перпендикулярном направлении.

Пусть на поверхность однородного плоского слоя по нормали падает плоская электромагнитная волна. При этом заданными считаются частота волны  $\omega$ , толщина слоя  $a$ , а также амплитуды напряженности электрического поля на передней ( $z=0$ ) и задней ( $z=a$ ) поверхностях слоя (последние достаточно просто могут быть найдены экспериментально). величиной, подлежащей определению, служит удельная электропроводность материала слоя  $\sigma$ .

Математическую основу задачи составляют уравнения электродинамики сплошных сред [4]. Нумеруя индексами 1,2 и 3 характеристики поля в областях  $z<0$ ,  $0\leq z\leq a$  и  $z>a$  соответственно, для амплитуд напряженности электрического и индукции магнитного полей имеем следующую систему уравнений.

$$\frac{d^2 E_1}{dz^2} + \frac{\omega^2}{c^2} E_1 = 0, \quad \frac{d^2 B_1}{dz^2} + \frac{\omega^2}{c^2} B_1 = 0,$$

$$\frac{d^2 E_2}{dz^2} + \mu_0 \mu \omega (\epsilon_0 \epsilon \omega - \sigma i) E_2 = 0, \quad B_2 = -\frac{1}{i\omega} \frac{dE_2}{dz}, \quad (1)$$

$$\frac{d^2 E_3}{dz^2} + \frac{\omega^2}{c^2} E_3 = 0, \quad \frac{d^2 B_3}{dz^2} + \frac{\omega^2}{c^2} B_3 = 0.$$

Здесь  $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные,  $\epsilon$ ,  $\mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости,  $\sigma$  –