

Компьютерное моделирование емкостного метода определения состояния приконтурного массива в окрестностях выработок

Дагаев Владимир Юрьевич

Аннотация

В работе представлены результаты компьютерного расчета и анализа вариаций электрического поля, создаваемого в околорудном пространстве горной выработки, на примере метода емкостного зондирования. Расчет проведен с целью улучшения натуральных измерений электрических характеристик с использованием данных этих расчетов.

Abstract

In this work are presented the results of a computer calculations, modeling and analysis of variations of the electric field, created in the space surrounding the excavation, by example of the capacitor probing method. These calculations were made with the aim of improvement of the natural measurements of electric characteristics with usage of calculations data.

При нарушении естественного поля напряжений в породном массиве примыкающие к контуру выработки горные породы испытывают воздействие дополнительных напряжений, происходит деформирование пород. Геофизический контроль в таком случае является главным источником получения своевременной информации о состоянии породного массива и недопущения аварийных ситуаций.

Для принятия своевременных мер по предотвращению обрушения пород необходимо знать литологическое строение массива и его напряженно-деформированное состояние.

В результате анализа литературных источников выявлено, что для прогнозирования опасных ситуаций целесообразно применять методы исследования, основанные на использовании емкостного зонда, погружаемого в шпур, и состоящего из нескольких электропроводящих колец, изолированных друг от друга. Один из вариантов подобного зонда рассматривался автором в работе [1].

Настоящая работа посвящена исследованию емкостного метода исследований путем решения краевой задачи математической физики,

описываемой эллиптическими дифференциальными уравнениями в частных производных относительно скалярной или однокомпонентной векторной функции.

Указанная задача достаточно эффективно может быть решена с помощью математического моделирования осесимметричных электрических полей методом конечных элементов с использованием программы ELCUT 5.1, которая была разработана производственным кооперативом "ТОР" [2].

Основные особенности программы

Электростатические задачи описываются уравнением Пуассона относительно скалярного электрического потенциала U ($\mathbf{E} = -\text{grad}U$, \mathbf{E} - вектор напряженности электрического поля). Для осесимметричных задач это уравнение имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} \left(\varepsilon_r r \frac{\delta U}{\delta r} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(\varepsilon_z \cdot \frac{\delta U}{\delta z} \right) = -\rho, \text{ где компоненты тензора электрической}$$

проницаемости ε_z , ε_r , а также плотность распределенного заряда ρ - постоянные величины в пределах блоков модели, r - текущий радиус.

При анализе результатов расчета электрического поля ELCUT позволяет оперировать со следующими локальными и интегральными физическими величинами.

Локальные величины:

- Скалярный электрический потенциал U ;
- Вектор напряженности электрического поля $\mathbf{E} = -\text{grad}U$

$$E_z = -\frac{\delta U}{\delta z}, \quad E_r = -\frac{\delta U}{\delta r} \text{ — в осесимметричном случае;}$$

- Тензор градиента напряженности электрического поля $\mathbf{G} = \text{grad}\mathbf{E}$

$$G_{zz} = \frac{\delta E_z}{\delta z}, \quad G_{rr} = \frac{\delta E_r}{\delta r}, \quad G_{zr} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta E_z}{\delta r} + \frac{\delta E_r}{\delta z} \right), \quad \text{а также его главные}$$

компоненты G_1 и G_2 ;

- Вектор электрического смещения $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$, где ε - тензор диэлектрической проницаемости.

Интегральные величины:

- Суммарный электрический заряд, заключенный в заданном объеме

$$q = \oint D \cdot nds ,$$

где интегрирование ведется по поверхности окружающей заданный объем, а \mathbf{n} - единичный вектор нормали к поверхности;

- Энергия электрического поля $W = \frac{1}{2} \int (E \cdot D) dV .$

Область интегрирования задается в плоскости модели замкнутым или разомкнутым контуром, состоящим из отрезков и дуг окружностей.

Описание модели

Исследуемая модель представляет собой имитирующий шпур пустотелый цилиндр длиной один метр и диаметром 40 мм в слоистой среде. В полость шпура вводится зонд, включающий в себя два электропроводящих кольца, шириной 20 мм с расстоянием между кольцами 25 мм. На первом электроде (потенциальном) устанавливается потенциал 1 В. На втором электроде (токовом) вычисляется наведенный заряд. Величина заряда вычисляется путем интегрирования по задаваемому замкнутому контуру, окружающему токовый электрод. Взаимная емкость между электродами C_{12} определяется как отношение $C_{12} = \frac{q_1}{U_2}$, где: q_1 - заряд на токовом электроде, U_2 - потенциал потенциального электрода.

Так как конструкция зонда достаточно жесткая то взаимная емкость между его электродами однозначно определяется электрофизическими свойствами окружающей среды.

При проведении моделирования зонд перемещается вдоль скважины методами надстройки "Label Mover", в результате чего открывается возможность построения графиков распределения электрических свойств среды вдоль шпура.

Схема модели при наличии двухслойной структуры окружающего пространства показана на рис. 1.

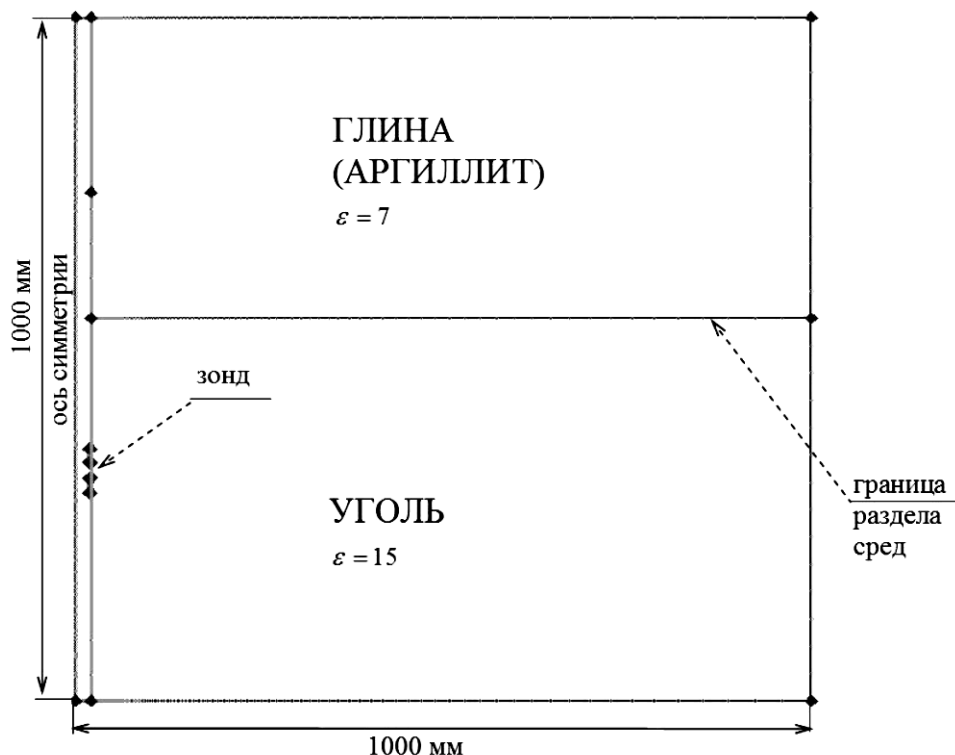


Рис.1.Схема модели двухслойной среды.

Результаты решения задачи

Результат решения краевой задачи методом конечных элементов представлен на рис. 2.

По горизонтальной оси отложены номера шагов в программе ELCUT (настройка Label Mover). Длина одного шага составляет 5 мм. По вертикальной оси отложено рассчитанное значение взаимной емкости в фарадах между потенциальным и токовым электродами зонда.

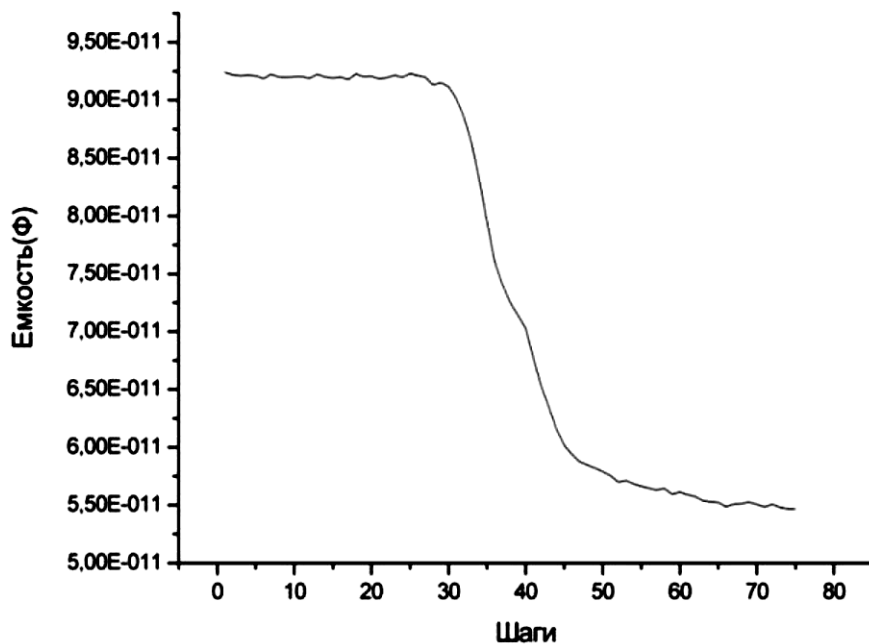


Рис. 2. Зависимость взаимной емкости между потенциальным и токовым электродами в двухслойной среде от глубины погружения зонда. Один шаг равен 5 мм смещения зонда.

Как следует из графика, указанная емкость составляет величину порядка 100 пФ и изменяется в 2 раза при переходе из одной среды в другую, что определяется соотношением диэлектрических проницаемостей сред уголь ($\varepsilon=15$) и аргиллит($\varepsilon=7$). Ширина переходной зоны в данных условиях составляет около 12 шагов или 60 мм.

Расслоение в угольном массиве

Возможность применения изучаемого метода для обнаружения трещин и расслоений в толще, например, угольного массива, исследовалась путем решения краевой задачи на основе модели представленной на рис. 1.

В середине исследуемой зоны размещается заполненная воздухом полость шириной 10, 20, или 40 мм.

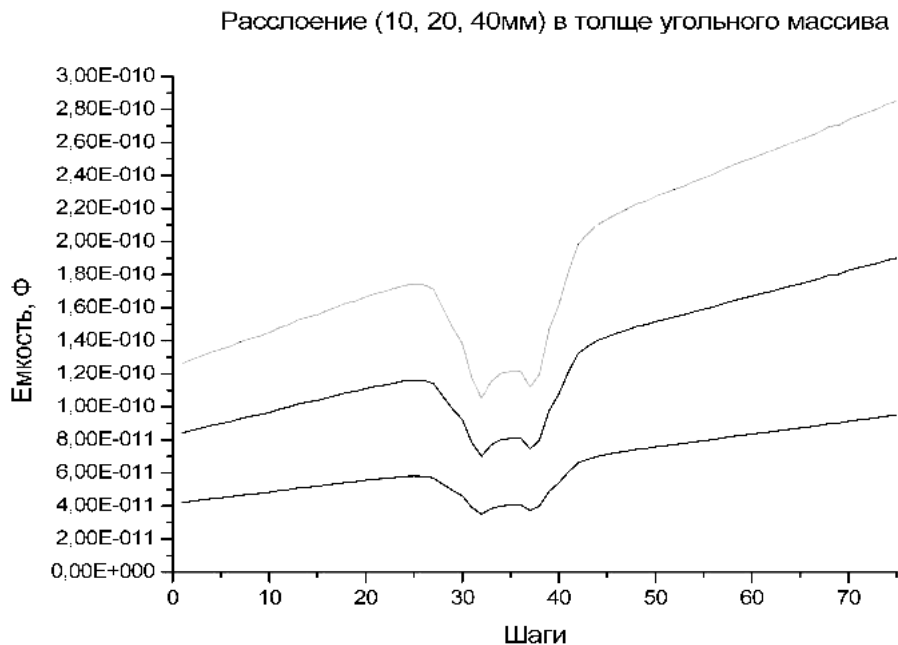


Рис. 3. Зависимость взаимной емкости между потенциальным и токовым электродами емкостного зонда от глубины погружения в угольной среде, имеющей расслоение (снизу вверх) – 10, 20, 40мм.

Распределение электрического поля при некотором положении зонда показано на рис. 4. Линии равного потенциала проведены через 0.01 В.

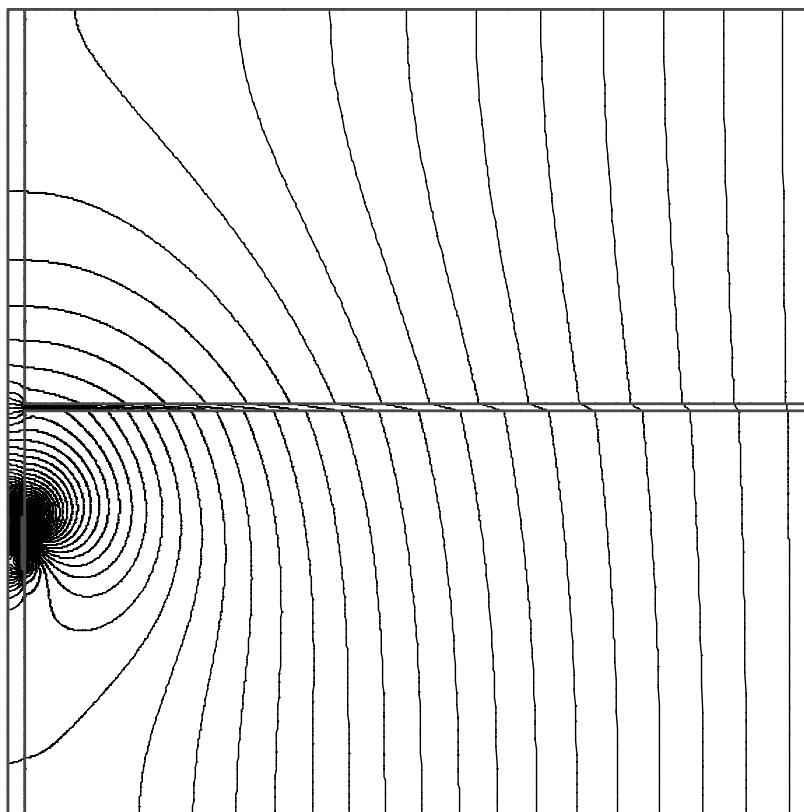


Рис. 4. Картина распределения электрического поля.

Выше рассматривалась задача вычисления емкостей зонда в присутствии полости, заполненной воздухом. Решим ту же задачу при условии, что полость заполнена водой. Результат решения показан на рис. 5. Для сравнения на этом же графике помещена кривая зависимости емкости зонда от глубины погружения в присутствии полости той же ширины 40 мм, но заполненной воздухом.

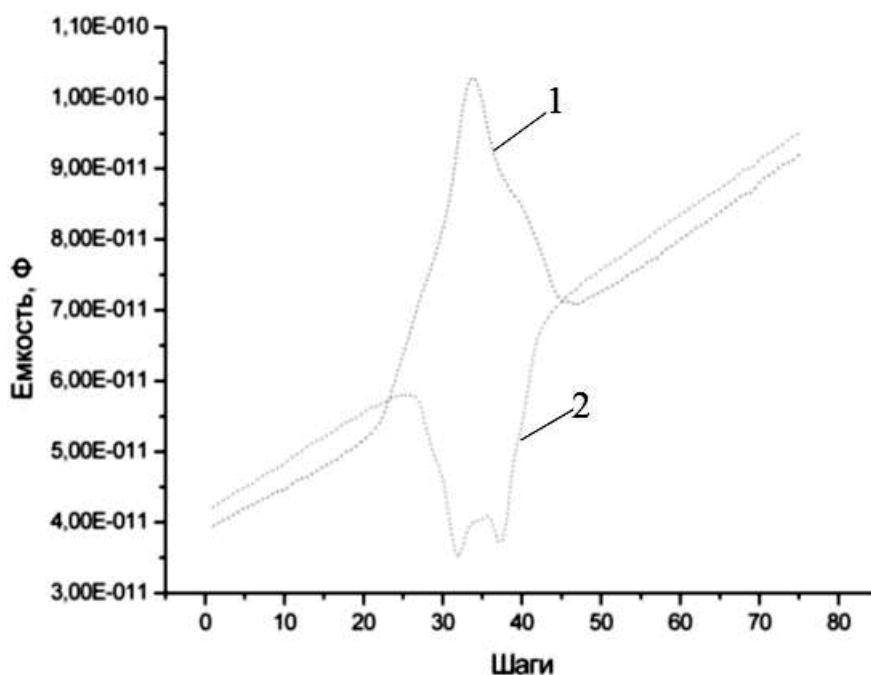


Рис. 5. Зависимость емкости зонда от глубины погружения при наличии полости 40мм, заполненной водой (кривая 1) и воздухом (кривая 2). Один шаг равен 5 мм.

Анализ графиков показывает, что приращения сигналов, вызванные пересечением полости зондом, имеют разный знак в зависимости от соотношения между диэлектрической проницаемостью заполнителя полости и диэлектрической проницаемостью массива. Форма сигнала зависит также от этого соотношения, что открывает возможности определения вида заполнителя полости методами детального машинного анализа формы соответствующей кривой.

Проведенное исследование подтверждает перспективность метода емкостного зондирования, по крайней мере, для целей определения координат и геометрии стыков горных пород, а также пустот в околоскважинном пространстве.

В работе установлено, что метод емкостного зондирования позволяет обнаруживать трещины и расслоения в массиве, причем, величина сигнала пропорциональна ширине трещины. Размер трещины определяется по величине изменения емкости или путем детального анализа формы этого изменения.

Автор выражает благодарность разработчикам программы решения электростатических задач ELCUT 5.1, которая, как показали представленные выше результаты, позволяет моделировать и рассчитывать многие параметры, позволяющие более точно проводить натурные измерения на массиве.

Список литературы

1. Дагаев В.Ю. Направления совершенствования емкостного метода для определения состояния приконтурного массива. Сборник научных трудов студентов магистратуры. М.; МГГУ, выпуск 3, 2002.
2. ELCUT 5.1. – Руководство пользователя. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Производственный кооператив ТОР. Санкт-Петербург, 2004.
3. Дагаев В. Ю. Электрометрический метод контроля состояния приконтурного массива в окрестности горных выработок. Тезисы межвузовских семинаров "Экологическая безопасность и устойчивое развитие", "Некоторые проблемы устойчивого развития горного производства", "Геоконтроль как необходимый элемент устойчивого развития горного производства". МГГУ г. Москва. 2004.