

УДК 550.37:537.868.3

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ОБРАЗЦОВ ГЕОМАТЕРИАЛОВ

А.С. Асаналиев

Разработано и протестировано программное обеспечение для автоматизации процесса измерения тангенса угла диэлектрических потерь геоматериалов при деформации.

*Ключевые слова:* тангенс угла диэлектрических потерь; триггерные эффекты; Актаком АМ-3001.

## MEASUREMENT FEATURES OF DIELECTRIC LOSS TANGENT OF GEOMATERIALS

A.S. Asanaliev

The software for automation process of measurement of dielectric loss tangent of geomaterials is developed and tested.

*Key words:* dielectric loss tangent; trigger effects, Aktakom AM-3001.

**Введение.** Экспериментальное исследование триггерных эффектов электромагнитных полей на образцы горных пород и искусственных материалов в настоящее время не утратило актуальности. Первые результаты в этой области были получены в геофизической обсерватории “Борок” ИФЗ РАН [1].

Лаборатория моделирования энергонасыщенных сред ИС РАН с 2001 г. занимается изучением влияния электромагнитных полей на процесс деформирования образцов геоматериалов. В работах [2, 3] выявлено, что активность сигналов акустической эмиссии, вызванная воздействием электромагнитного поля, резко возрастает при значениях нагрузки выше 70–80 % от разрушения. В ходе этих экспериментов производилось регистрация сигналов акустической эмиссии, продольных и поперечных деформаций и величины нагрузки на образце. Несмотря на то, что известны параметры воздействующего электромагнитного поля, оценить его энерговклад крайне сложно. В связи с этим необходимо ввести измерение нового параметра – тангенса угла диэлектрических потерь.

Угол диэлектрических потерь является важной характеристикой горных пород, представляющей собой величину, определяющую способность горной породы рассеивать энергию электрического поля и время установления поляризации, показывающее, на какие частоты электрического поля горная порода интенсивно реагирует. В настоящее время в работах ряда исследователей достаточно хорошо изучена и теоретически описана зависимость угла диэлектрических потерь горных пород

от температуры [4], их химического состава [5], а также частоты внешнего электрического поля [6]. Связь тангенса угла диэлектрических потерь с деформацией материала остается малоизученной. В связи с этим ставится задача измерения новой величины в автоматическом режиме.

**Постановка задачи.** В электрическом конденсаторе с идеальным диэлектриком, т. е. диэлектриком без потерь, вектор тока  $I_c$  опережает вектор напряжения на  $90^\circ$ . В реальных диэлектриках угол между током, протекающим через емкость, и напряжением меньше  $90^\circ$  за счет потерь, которые вызывают протекание активного тока  $I_a$ , совпадающего по фазе с напряжением. Угол  $d$ , дополняющий угол сдвига фаз между током и напряжением до  $90^\circ$ , называется углом диэлектрических потерь.

Тангенс угла диэлектрических потерь – отношение мнимой и вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon_{im}}{\varepsilon_{re}} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a},$$

где  $\varepsilon_{im}$  – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости;  $\varepsilon_{re}$  – вещественная часть комплексной диэлектрической проницаемости;  $\sigma$  – тензор проводимости;  $\omega$  – циклическая частота;  $\varepsilon_a$  – тензор абсолютной диэлектрической проницаемости.

Тангенс угла потерь определяется отношением активной мощности  $P_a$  к реактивной  $P_p$  при синусоидальном напряжении определенной частоты. Величина, обратная  $\operatorname{tg} \delta$ , называется добротностью

конденсатора. Термины добротности и тангенса угла потерь применяются также для катушек индуктивности и трансформаторов [7].

Для измерения тангенса угла диэлектрических потерь в ходе эксперимента использовали измеритель иммитанса Актаком АМ-3001. Данный прибор представляет собой устройство для измерения LCR характеристик радиоэлектронных компонентов и электрических цепей. Он имеет возможность контролировать величины, различающиеся на 13 порядков, основную точность измерений 0,05 % и 5 измерительных частот. Прибор может измерять 5 величин: емкость  $C$ , активное сопротивление  $R$ , индуктивность  $L$ , добротность  $Q$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $D$ . Нижний предел измерения для величины тангенса угла диэлектрических потерь  $D$  равен 0.00001, верхний – 10. Установка режимов, запуск и считывание результатов измерений могут выполняться как вручную, так и программно, по интерфейсам RS-232, GPIB и Handler.

Подключение образца к прибору осуществляли через коаксиальный кабель. На конце кабеля для подключения к образцу имеются графитовые электроды, которые плотно прижимаются к образцу с помощью резинового хомута.

Для автоматизации процесса измерения было написано программное обеспечение на языке C++, реализующее управление прибором и сбор данных через параллельный интерфейс RS-232. Для работы с ним использована библиотека “RS-232 for Linux, FreeBSD and Windows”. Программа представляет собой консольное приложение. Она последовательно меняет значение частоты прибора и считывает значения тангенса диэлектрических потерь несколько раз на каждой частоте, усредняя полученное значение тангенса. Весь процесс длится заданное время с определенной частотой повторения. Считывание значений производится на 5 частотах: 100, 120 Гц, 1, 10 и 100 кГц. Данные для настройки параметров работы программы, такие как, параметры соединения с портом, параметры сохранения, параметры периодичности и длительности опроса, хранятся и считываются из файла настройки конфигурации.

Поскольку эксперимент длится от 3 до 4 суток, то требовалось выяснить, как будут вести себя показания прибора во времени. Тестирование программного обеспечения и измерительного комплекса проводили сначала на различных видах конденсаторов, а затем на образцах мрамора и гранита без нагрузки. Тесты с конденсаторами прошли без каких-либо сложностей и дали устойчивые результаты. В ходе первых тестов на образцах геоматериалов, длительностью несколько часов, было выявлено, что на некоторых частотах

присутствуют значительные вариации измеренных значений тангенса угла диэлектрических потерь. Поэтому были проведены тестирования в течение 96 часов на образцах геоматериалов. Цель тестирования – определение параметров измерения, дающих наиболее устойчивые результаты, и внесение доработок, направленных на улучшение качества полученных результатов.

Ниже представлены графики результатов тестирования длительностью 96 часов, проведенных на образце мрамора с месторождения Ак-Таш (Кыргызстан) (рисунки 1–5).

На частоте 100 Гц значение среднеквадратического отклонения составляло 17 % от значения математического ожидания величины тангенса угла диэлектрических потерь. Очевидно, что измерять величину на данной частоте нецелесообразно.

На частоте 120 Гц значение среднеквадратического отклонения составляло 3,5 % от значения математического ожидания величины тангенса угла диэлектрических потерь, что является более приемлемым.

На частоте 1 кГц значение среднеквадратического отклонения было еще меньше и составляло 2,28 % от значения математического ожидания величины тангенса угла диэлектрических потерь.

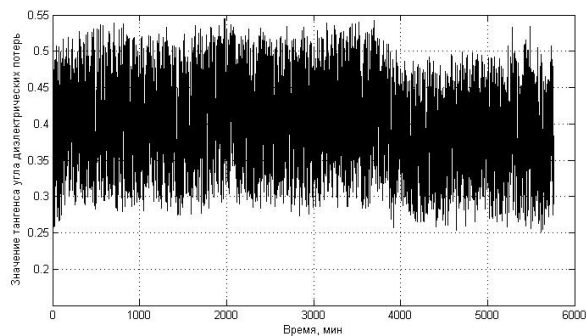


Рисунок 1 – Измерения тангенса угла диэлектрических потерь при 100 Гц

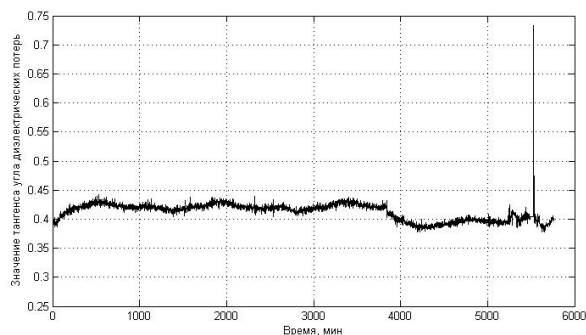


Рисунок 2 – Измерения тангенса угла диэлектрических потерь при 120 Гц

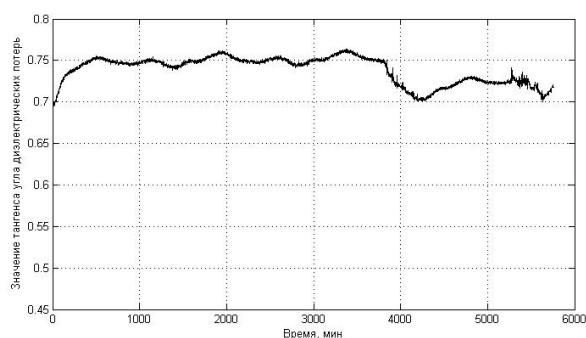


Рисунок 3 – Измерения тангенса угла диэлектрических потерь при 1 кГц

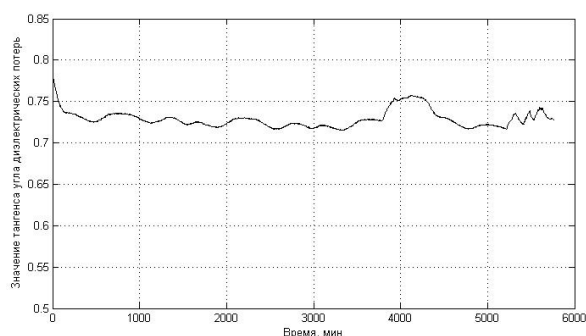


Рисунок 4 – Измерения тангенса угла диэлектрических потерь при 10 кГц

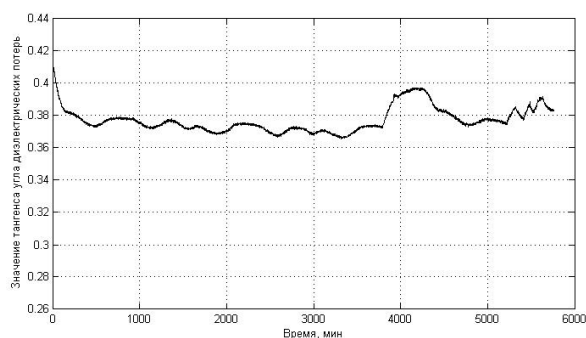


Рисунок 5 – Измерения тангенса угла диэлектрических потерь при 100 кГц

Минимальное в относительном значении среднеквадратическое отклонение было получено на частоте 10 кГц и составляло 1,47 % от значения математического ожидания величины тангенса угла диэлектрических потерь.

На частоте 100 кГц значение среднеквадратического отклонения составляло 2,06 % от значения математического ожидания величина тангенса угла диэлектрических потерь.

Таким образом, было выявлено, что измерения тангенса угла диэлектрических потерь для образца мрамора месторождения Ак-Таш лучше проводить на 4 из 5 возможных частот прибора Актарком АМ-3001 – 120 Гц, 1, 10 и 100 кГц. Для образца гранита были проведены аналогичные испытания. Наиболее устойчивые результаты были получены также на этих частотах.

Разработанный и протестированный комплекс для регистрации тангенса угла диэлектрических потерь готов к использованию при исследовании влияния электромагнитных полей на процесс деформирования кристаллических диэлектриков (образцов горных пород) наряду с акустоэмиссионными и деформационными измерениями. Исследование осуществлено в рамках выполнения государственного задания ИС РАН, тема №78.

#### Литература

1. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники / Г.А. Соболев, А.В. Пономарев. М.: Наука. 2003. 270 с.
2. *Закупин А.С., Авагимов А.А., Богомолов Л.М.* Отклики акустической эмиссии геоматериалов на воздействие электроимпульсов при различных величинах сжимающего напряжения / А.С. Закупин, А.А. Авагимов, Л.М. Богомолов // Физика Земли. 2006. № 10. С. 43–50.
3. *Богомолов Л.М., Закупин А.С., Сычев В.Н.* Электродействия на земную кору и вариации слабой сейсмичности / Л.М. Богомолов, А.С. Закупин, В.Н. Сычев. Издательский дом: Lambert Academic Publishing, Saarbrücken: Reha GmbH, 2011. 408 с. ISBN 978-3-8465-1436-8. (Электронная книга).
4. *Дортман Н.Б.* Физические свойства горных пород и полезных ископаемых / Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1984. 455 с.
5. *Воробьев А.А., Тонконогов М.П., Векслер Ю.А.* Теоретические вопросы физики горных пород / А.А. Воробьев, М.П. Тонконогов, Ю.А. Векслер. М.: Недра, 1972. 150 с.
6. *Гусейнов А.А.* Исследование электропроводности минералов класса слоистых силикатов и горных пород в зависимости от температурного и кристаллохимического факторов: дис. ... д-ра физ.-мат. наук / А.А. Гусейнов. М.: ИФЗ, 2012. 362 с.
7. *Петров К.С.* Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника / К.С. Петров. СПб.: Питер, 2003. 506 с.