Journal of International Scientific Publications:
Materials, Methods & Technologies, Volume 5, Part 3
ISSN 1313-2539, Published at: http://www.science-journals.eu

INVESTIGATION OF THE DIELECTRIC PROPERTIES OF SHALE

Sergey M. Martemyanov
National Research Tomsk Polytechnic University
Tomsk Polytechnic University
30, Lenin Avenue, Tomsk 634050, Russia

Abstract

The article is dedicated to investigation of the dielectric properties of oil shale. Investigations for samples prepared from shale mined at the deposit in Jilin Province in China were done. The temperature and frequency dependences of rock characteristics needed to calculate the processes of their thermal processing are investigated.

Frequency dependences for the relative dielectric constant and dissipation factor of rock in the frequency range from 0,1 Hz to 1 MHz are investigated. The temperature dependences for rock resistance, dielectric capacitivity and dissipation factor in the temperature range from 20 to 600°C are studied.

Key words: *shale, dielectric properties, relative dielectric constant, dissipation factor, temperature dependence, frequency dependence.*

1. ВВЕДЕНИЕ

Основную часть мирового энергетического баланса пока еще составляют нефть и газ. Однако в связи с истощением их мировых запасов все более актуальной становится проблема поиска альтернативных способов получения энергоносителей. Пока эта проблема не обрела идеального решения, но поиски и сравнения претендентов продолжаются непрерывно.

Твердые горючие ископаемые – каменный уголь и горючие сланцы – могут обеспечить планету энергией еще многие столетия. Но, к сожалению, твердое топливо малопригодно для широкого применения. Задачи его транспортировки, дозирования, контроля качества создают серьезные трудности. Его невозможно транспортировать по трубопроводу, свойства пород даже одного месторождения могут серьезно различаться. Сжигание такого топлива возможно только на специализированных установках и только после специальной предварительной обработки. В итоге все это увеличивает конечную стоимость энергии.

Решение этой проблемы предлагают активно развивающиеся в настоящее время методы переработки твердых горючих ископаемых, основанных на нагреве пород. Особенно это актуально для горючих сланцев, так как они в большинстве случаев не пригодны к использованию другим способом из-за высокой зольности и низкой теплоты сгорания.

Нагрев осуществляют различными способами. Один из вариантов заключается в пропускании через породу высокочастотного переменного электрического тока. Разогрев породы при этом происходит за счет возникающих диэлектрических и резистивных потерь.

При таком способе нагрева мощность потерь, выделяемая в межэлектродном пространстве, определяется по формуле:

$$P(t,T,f)=\sigma(T,f)E_{cp}^2(T,f)+kE_{cp}^2(T,f)S^2 f\varepsilon_0\varepsilon(T,f)tg\delta(T,f)$$

σ – удельная проводимость породы, Ом·м;

$E_{ср}$ – напряженность поля, В/м;

k – численный коэффициент;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, $8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

f – частота, Гц;

$tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь;

S – расстояние между электродами, м.

T – температура;

t – время.

Численный коэффициент k зависит от геометрических параметров электродной системы и определяет электрическую емкость между электродами: $C = k\varepsilon_0\varepsilon$.

Выделяемая мощность в соответствии с формулой состоит из двух слагаемых. Резистивные потери (первое слагаемое) определяются удельным сопротивлением твердого топлива и напряженности поля, создаваемого источником электроэнергии. Диэлектрические потери (второе слагаемое) зависят от диэлектрических свойств породы и электрической емкости межэлектродного пространства. Для проектирования технологии и устройств нагрева, а также определения выходных параметров необходимо знать диэлектрические свойства среды и их температурные и частотные зависимости.

В связи с этим были проведены исследования диэлектрических свойств горючих сланцев, добываемых в Китайской народной республике на месторождении провинции Цзилинь.

Для проведения измерений необходимо изготовить измерительные образцы исследуемой породы, имеющие форму тонких плоскопараллельных пластинок.[1] Для получения разумного значения точности измерений необходимо изготовить как можно более тонкие образцы при заданных размерах измерительных электродов. При диаметре дисковых электродов ~25мм толщина образцов должна быть ~2мм. При этом емкость образца составляет около 25пФ и поддается измерению с точностью до ±0,1%.[2] Проблема, связанная с изготовлением образцов, заключается низкой механической прочности породы, вследствие чего при резке даже алмазным диском она расслаивается и крошится. Для решения этой задачи была отработана технология изготовления образцов, заключавшаяся в следующем. Исходные фрагменты породы, из которых изготавливались образцы, заливались в полиэфирную смолу марки G102TB. Такая мера придавала исходным образцам механическую прочность, необходимую для резки. При этом смола благодаря быстрому затвердеванию не проникает глубоко внутрь породы и не влияет на диэлектрические свойства образцов.

Получившаяся заготовка хорошо поддается резке на отрезном станке с алмазным диском. Дальнейшая обработка образца возможна наждачной бумагой. При таком способе изготовления образцов можно получать пластинки толщиной 2-3мм.

ISSN 1313-2539, Published at: http://www.science-journals.eu

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

При исследовании температурной зависимости удельного электрического сопротивления породы использовалось 4 образца. Измерение зависимости проводилось в диапазоне температур от 20 до 800°C. График полученной характеристики, усредненной по четырем образцам, показан на рис.2.

График построен с использованием логарифмической шкалы для удельного сопротивления. По оси абсцисс отложены значения обратной температуры 1000/T. Такие координаты выбраны для удобства расчета энергии активации породы, характеризующей ширину запрещенной зоны полупроводника.

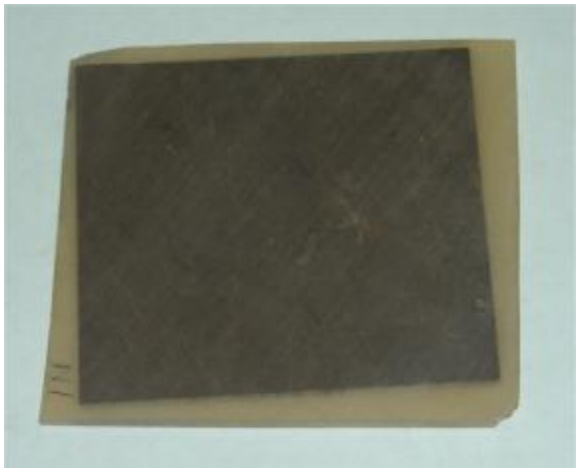


Рис.1. Образец для измерения

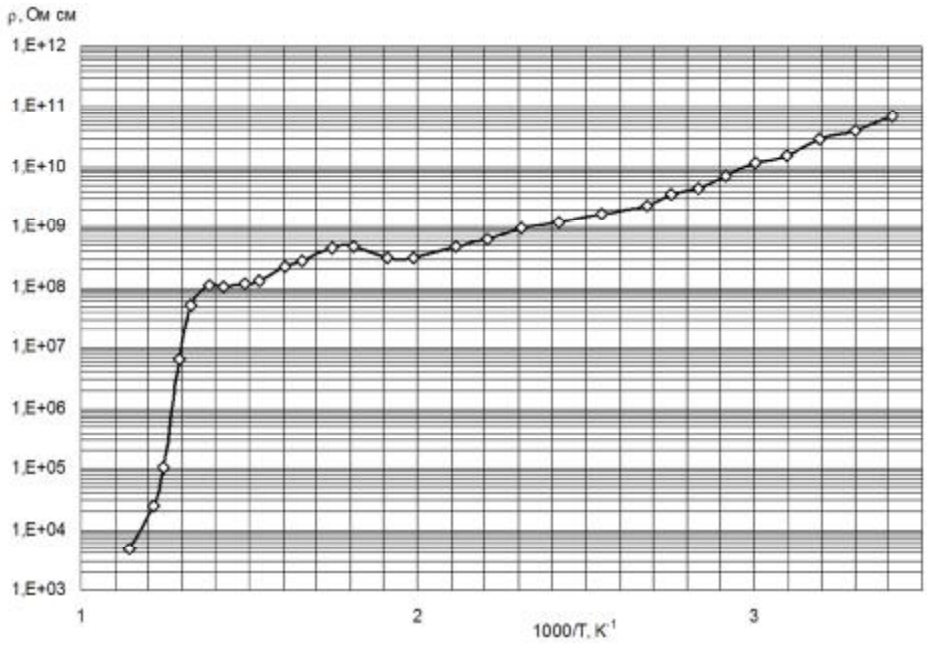


Рис.2. Температурная зависимость удельного сопротивления

В областях температур, где концентрации носителей заряда равновесны, зависимость должна быть линейной. Тангенс угла наклона характеристики в таком случае характеризует энергию активации носителей заряда:

$$\Delta W = 2k \frac{\Delta(\ln \rho)}{\Delta(1/T)},$$

где k = 1,38·10^{-23}Дж/К – постоянная Больцмана.

В области температур 20-500°С зависимость близка к линейной и характеризует энергию активации носителей заряда, обусловленных наличием примесей. Энергия активации в этой зоне составляет 0,75эВ.

В области температур выше 700°С также возникает линейная зависимость, свидетельствующая о том, что материал переходит в зону собственной проводимости. Энергия активации в этой области, рассчитанная по углу наклона характеристики, составляет 7,87эВ.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

В холодном состоянии удельное сопротивление твердых топлив достаточно велико – 10^8-10^{12} Ом·см. Значение резистивных потерь при таком сопротивлении будет мало для разогрева фрагмента породы. Поэтому осуществлять нагрев только за счет резистивных потерь невозможно. По мере нагрева величина удельного сопротивления значительно падает, однако начальный разогрев породы в нашем случае необходимо вести за счет диэлектрических потерь. Для обеспечения условия максимального значения диэлектрических потерь необходимо нагрев вести на частоте, где потери максимальны. Для решения этой задачи необходимо исследовать поведение диэлектрических свойств материала в частотном диапазоне.

Величину энергии диэлектрических потерь, затрачиваемой на каждый период внешнего сигнала, характеризует значение тангенса угла потерь. Величина этого параметра зависит как от частоты внешнего сигнала, так и от температуры материала.

Изменение диэлектрических потерь материала в зависимости от частоты характеризует кривая тангенса угла потерь $tg\delta(f)$. Для большинства диэлектриков эта кривая имеет максимум на определенной частоте. Для материалов, имеющих сложный состав, этих максимумов может быть несколько.

Твердые горючие ископаемые представляют собой слоистый материал, следовательно, обладают анизотропией свойств. То есть физические и химические свойства, определяемые молекулярной структурой вещества, будут различаться в зависимости от ориентации слоев породы. В частности, диэлектрические потери возникают вследствие ориентации диполей молекул под действием внешнего электромагнитного поля. Таким образом, имеет смысл исследовать диэлектрические параметры как при прохождении поля вдоль слоев, так и поперек слоев. Для соответствующих исследований необходимо изготавливать образцы с продольной и поперечной ориентацией слоев.

Частотные зависимости диэлектрических свойств горючих сланцев исследовались с помощью прибора фирмы Solartron Analytical. Полученные частотные зависимости тангенса угла потерь показаны на рис.3 и 4.

На рис.3 показаны характеристики $tg\delta(f)$, снятые для 5 образцов, при прохождении поля поперек слоев сланцевого пласта. Для этих измерений использовались образцы, изготовленные

ISSN 1313-2539, Published at: http://www.science-journals.eu

вдоль слоев. На рис.4 показаны характеристики *tg*δ(*f*) для поперечных образцов, то есть поле ориентировано вдоль слоев. В данных измерениях использовалось 4 образца.

Кривые имеют четко выраженные максимумы, которые лежат в диапазоне от 100Гц до 10кГц для продольных образцов и от 10кГц до 100кГц для поперечных образцов.

Каждый образец имеет только один максимум, то есть с точки зрения диэлектрических свойств порода ведет себя как однородный материал. Однако максимумы тангенса угла потерь для разных образцов приходятся на разные частоты.

Разница в частотах, на которые приходится максимум *tg*δ(*f*) для разных образцов, обусловлена неоднородностью материала твердых горючих ископаемых. Их состав, а следовательно и свойства, в том числе диэлектрические параметры, могут значительно отличаться не только в пределах одного месторождения, но и для образцов, изготовленных из одного фрагмента породы. Таким образом, для получения достоверных данных, эквивалентных характеристикам целого пласта, необходимо исследование по возможности большого количества образцов с усреднением полученных значений.

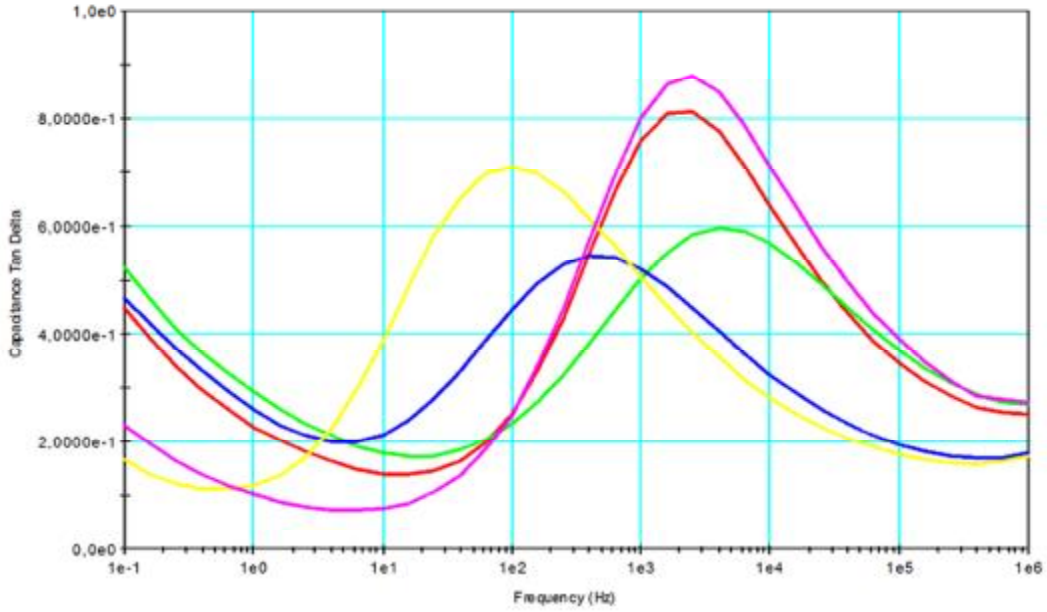


Рис.3. Частотная зависимость тангенса угла потерь сланцев (поле поперек слоев)

ISSN 1313-2539, Published at: http://www.science-journals.eu

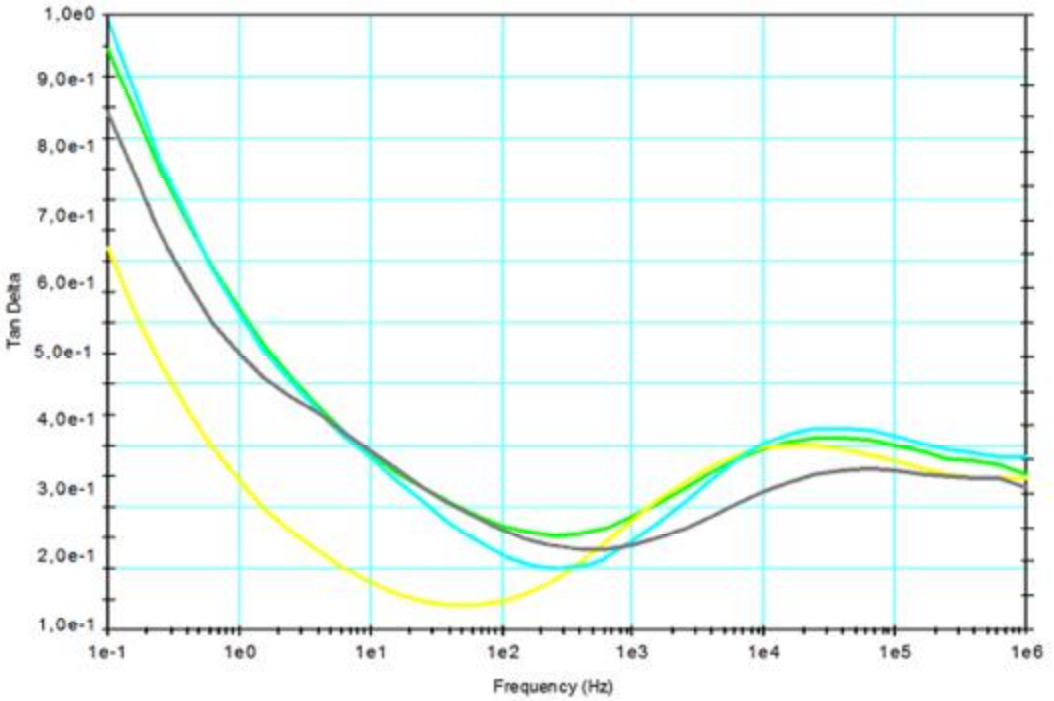


Рис.4. Частотная зависимость тангенса угла потерь сланцев (поле вдоль слоев)

Характеристики относительной диэлектрической проницаемости исследованы также для продольных и поперечных образцов. Полученные зависимости показаны на рис.5 и 6.

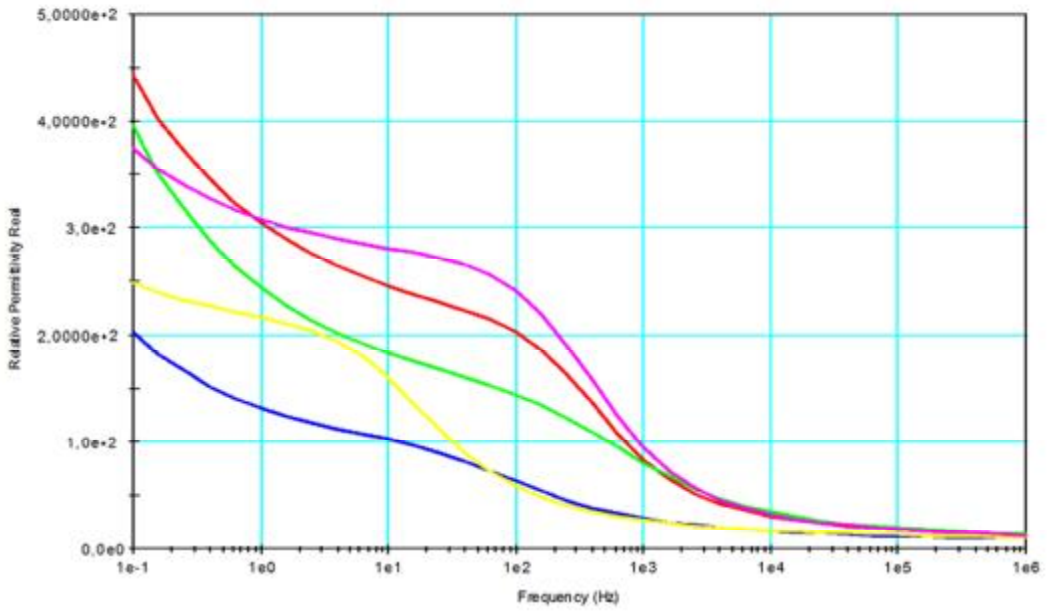


Рис.5. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости сланцев (поле вдоль слоев)

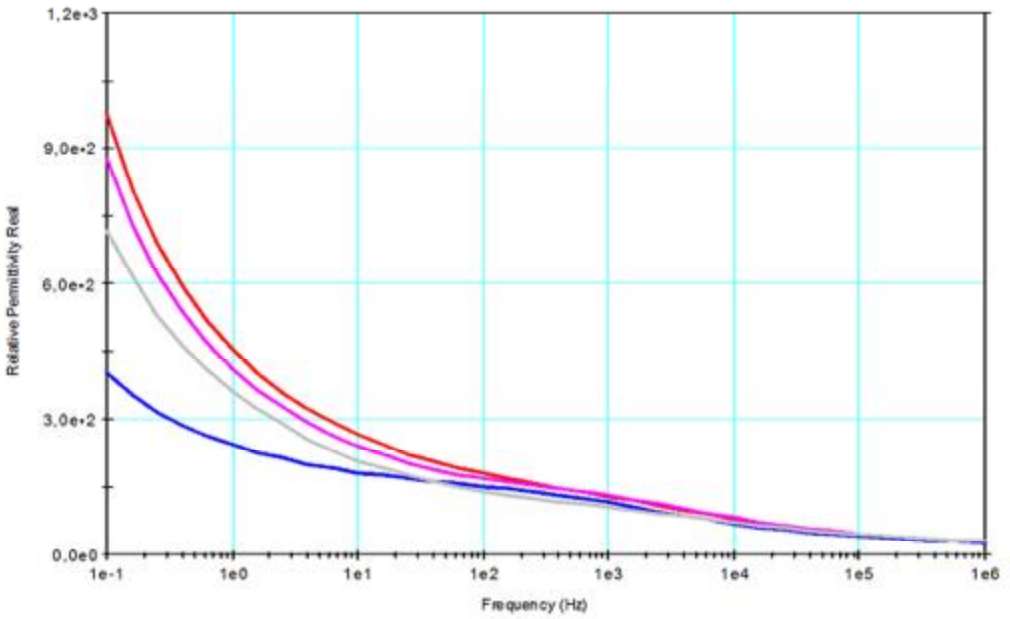


Рис.6. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости сланцев (поле поперек слоев)

Полученные характеристики для разной ориентации слоев пласта имеют разный характер, что подтверждает анизотропию диэлектрических свойств горючих сланцев. Что характерно, кривые относительной диэлектрической проницаемости имеют изгибы характеристик на частотах, коррелирующих с максимумами кривых $tg\delta(f)$ аналогичных образцов, что подтверждает наличие физических явлений, детерминирующих характер полученных зависимостей.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТАНГЕНСА УГЛА ПОТЕРЬ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Для исследования температурных зависимостей использовались измерительные мосты Е7-8, измеряющий диэлектрические параметры на частоте 1кГц, и Е7-12, измеряющий диэлектрические параметры на частоте 1МГц. Измерения проводились на установке, имеющей вакуумируемую нагревательную камеру с теплоизоляцией, снабженной несколькими встроенными термопарами для измерения температуры.

Температурные зависимости исследованы только для образцов, изготовленных вдоль слоев. Образцы, с поперечной ориентацией слоев при нагреве быстро теряют механическую прочность и теряют форму, поэтому исследовать их в температурном диапазоне не удалось.

Температурная зависимость тангенса угла потерь показана на рис.7. Зависимость снята на частотах 1кГц и 1МГц.

ISSN 1313-2539, Published at: http://www.science-journals.eu

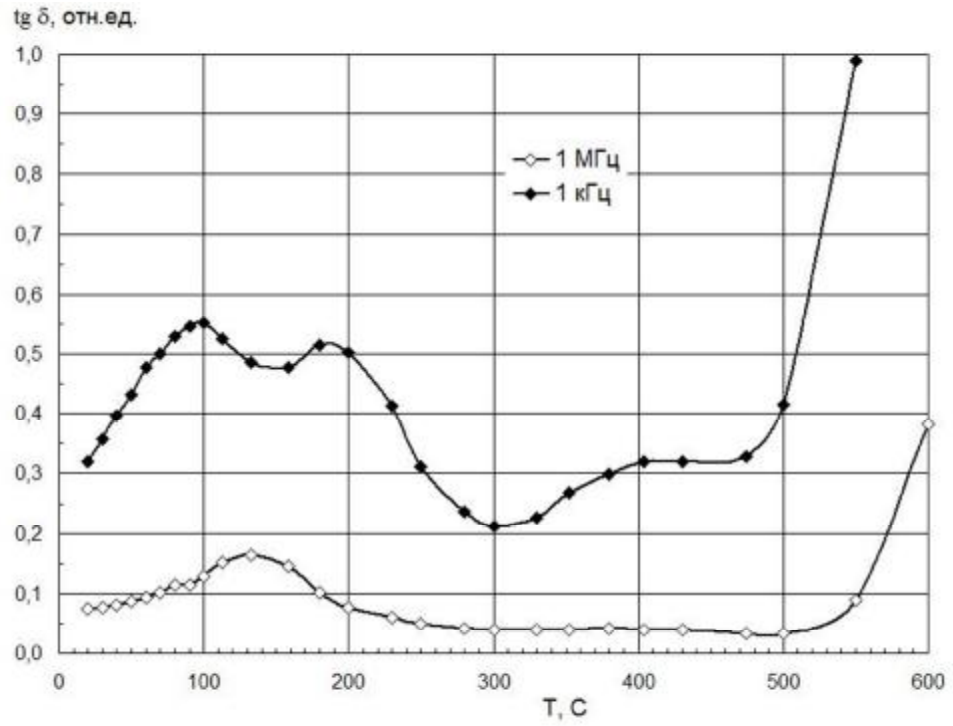


Рис.7. Температурная зависимость тангенса угла потерь

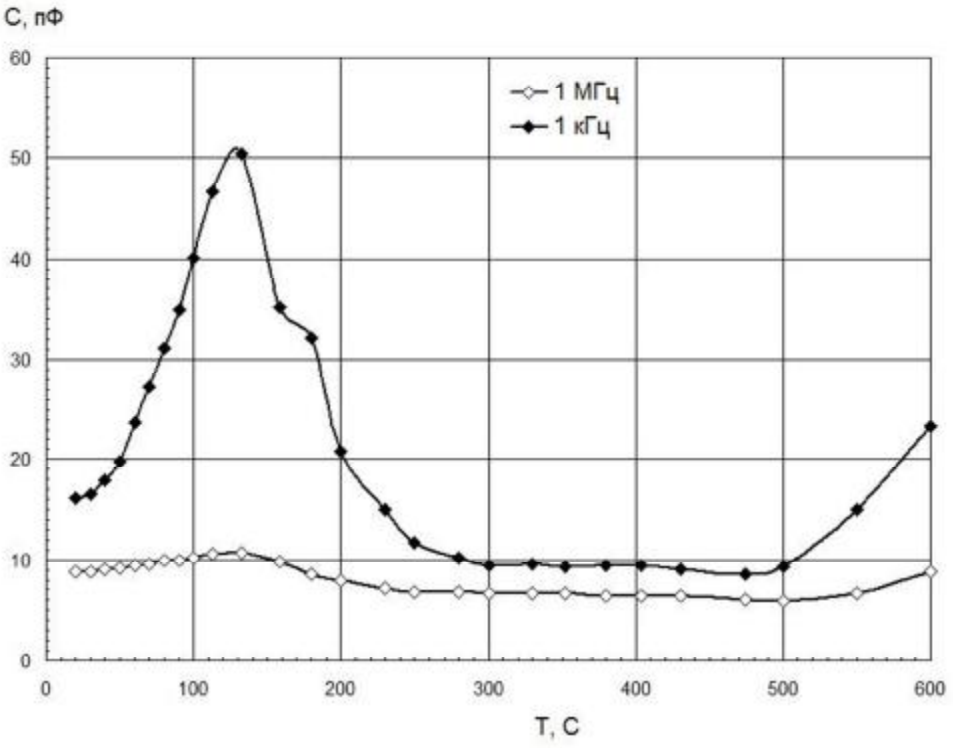


Рис.8. Температурная зависимость емкости образца

Величина мощности диэлектрических потерь зависит также от значения емкости межэлектродного пространства. Эта емкость определяется геометрической конфигурацией электродной системы и величиной относительной диэлектрической проницаемости среды, которая также будет зависеть от температуры и частоты. Таким образом, необходимо знать температурную зависимость диэлектрической проницаемости. На рис.8 показана усредненная зависимость емкости образца от температуры. Рассчитать относительную диэлектрическую проницаемость в чистом виде не удалось из-за наличия систематической ошибки, обусловленной наличием значительных паразитных емкостей. Однако полученные кривые позволяют сделать вывод о поведении диэлектрической проницаемости в температурном диапазоне.

Видно, что значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь значительно меняются в температурном диапазоне. Таким образом, при расчете динамики процесса нагрева породы переменным электрическим током необходимо учитывать изменение свойств от температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Казарновский Д.М., Тареев Б.М., Испытания электроизоляционных материалов. – М.: Госэнергоиздат, 1964. – 312с.

2. Е7-8. Измеритель L, C, R цифровой. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 2.724.007 ТО, МНИПИ, Минск, 1987г.