

Физика и материаловедение

УДК 539.1.043

Н.С. Костюков, Е.В. Щербакова

ВЛИЯНИЕ ТРАНСМУТАНТОВ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ КЕРАМИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Работа посвящена исследованию влияния нейтронной составляющей космического и реакторного излучения на диэлектрическую проницаемость электрофарфора М-23. Расчет диэлектрических параметров в области релаксационных частот проводится на основе дифференциального уравнения вынужденных колебаний с затуханием. Представлены результаты вычислений диэлектрической проницаемости электрофарфора М-23 до и после облучения в реакторе BOR-60.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, нейтронное излучение, космическое излучение, электрофарфор, резонансная частота, релаксационная область.

THE INFLUENCE OF TRANSMUTANTS TO THE DIELECTRIC PERMITTIVITY OF CERAMICAL DIELECTRICS

The paper is devoted to influence of neutron component of cosmic and atomic radiation to the dielectric permittivity of electric insulator porcelain M-23. The calculate of dielectric permittivity of relaxation band is based on differential equation of forced oscillations with attenuation. There are the results of calculations of dielectric permittivity of electric insulator porcelain M-23 before and after radiation in BOR-60.

Key words: dielectric permittivity, neutron radiation, cosmic radiation, electric insulator porcelain, resonance frequency, relaxation band.

Теоретические и экспериментальные исследования свойств керамических материалов в области релаксационных диэлектрических параметров (ϵ , $\text{tg}\delta$, γ) связаны со структурой материала на наноуровне (10^{-9} м) через резонансную частоту в дифференциальном уравнении второго порядка вынужденных колебаний, описывающего поведение диэлектрика в переменных электрических полях. Область в диэлектрике с пониженной энергией активации (область релаксации $R \approx 10^{-9}$ м) является чувствительным параметром, определяющим величину резонансной частоты, а следовательно, ϵ и $\text{tg}\delta$. Так как величина области релаксации является технологическим параметром, то, измеряя ϵ и $\text{tg}\delta$, можно осуществить отработку и оптимизацию технологического процесса на наноуровне.

Экспериментальные исследования изменений $\text{tg}\delta$ керамических диэлектриков при облучениях, проводившихся в реакторе ВВР до флюенсов 10^{19} нейтрон/см², при соотношении между быстрыми и тепловыми нейтронами 1:10, показали в ряде случаев значительные отклонения от исходных значений [2]. Измерения свидетельствуют, что тангенс угла диэлектрических потерь у всех образцов керамики (статиты, фарфор, глиноземистые материалы, кордиерит и др.) после облучения увеличива-

ются. Минимальные изменения под действием радиации претерпевают высокоглиноземистая керамика 22ХС и электротехнический фарфор М-23, имеющие высокую концентрацию структурных дефектов в исходном состоянии.

Изменение диэлектрических свойств керамических материалов может происходить и в условиях действия космического излучения. На высоте до 50 км при взаимодействии первичного космического излучения с ядрами атомов атмосферы – азота, кислорода, аргона – в результате ядерных реакций происходит расщепление ядер атмосферы, в результате образуются все известные элементарные частицы, в том числе и нейтроны. При высоких энергиях рожденных частиц в атмосфере возникают лавинообразные ядерные каскады. Нейтроны возникают на каждой ступени ядерного каскада. Большая часть нейтронов рождается в испарительных звездах [7] и только 10-15 % – в процессах прямых соударений. В столбе воздуха сечением 1 см^2 в результате превращений типа испарительных звезд и в результате прямых соударений за 1 сек рождается порядка $5 \div 9$ нейтронов. Число рожденных за 1 сек нейтронов зависит от солнечной активности. В период ее минимума в северных широтах дифференциальные потоки нейтронов альбеда на площадку 1 см^2 составляют: $N(E < 1 \text{ МэВ}) = 0,825 \text{ нейт/см}^2\text{с}$, $N(E \approx 1 \div 10 \text{ МэВ}) = 0,475 \text{ нейтрон/см}^2\text{с}$, $N(E > 10 \text{ МэВ}) = 0,077 \text{ нейтрон/см}^2\text{с}$.

Нейтроны, выходящие за пределы атмосферы, – нейтроны-альбеда, – могут участвовать в процессе β -распада и тем самым подпитывать радиационные пояса Земли, а могут взаимодействовать с элементами космических аппаратов. В связи с этим представляет интерес изучение влияния взаимодействия нейтронов на свойства композиционных материалов космической техники. Суммарный флюенс нейтронов в космическом пространстве значительно ниже, чем в атомном реакторе. Но даже при такой плотности нейтронного потока, учитывая длительность нахождения аппаратов в условиях космоса – несколько лет или десятилетий, облучение может привести к существенным изменениям свойств керамических образцов. Кроме того, взаимодействие медленных нейтронов с ядрами элементов космических аппаратов в результате ядерных реакций может вызвать появление радиоактивных изотопов, способствующих усилению общего радиационного фона, что не может не сказаться на биологическом воздействии на экипаж пилотируемого корабля. Проводимые экспериментальные исследования [8] подтверждают влияние космического излучения на поглощательную способность большинства композиционных материалов.

Фарфоры являются наиболее распространенными среди керамических электроизоляционных материалов. В промышленности широко используются алюмосиликатные, высокоглиноземистые, бариевые, кальциевые, магниевые и др.

Рассмотрим наиболее распространенный в электротехнике кварцевый алюмосиликатный фарфор М-23, применяемый для производства высоковольтных изоляторов. Структура фарфора М-23 неоднородна. Основная масса состоит из муллита с большим количеством кристаллического $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и кварца, сцементированного алюмосиликатной стеклофазой. Состав образца М-23 по окислам приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав М-23 по окислам в исходном состоянии

| Окислы | Массовая доля, % |
|-------------------------|------------------|
| Al_2O_3 | 25,7 |
| SiO_2 | 68,3 |
| Fe_2O_3 | 0,25 |
| CaO | 0,22 |
| MgO | 0,22 |
| Na_2O | 1,8 |
| K_2O | 3,5 |

Элементный состав электротехнического фарфора М-23 до и после облучения в каналах ВЭК-8 и ВО-7 реактора БОР-60 – в табл. 2. Суммарный флюенс нейтронов в канале ВЭК-8 составляет $3,7 \cdot 10^{21}$ нейтрон/см², в канале ВО-7 – $2,3 \cdot 10^{22}$ нейтрон/см².

Таблица 2

Элементный состав фарфора М-23 до и после нейтронного облучения в каналах реактора БОР-60

| Элемент | До облучения ядер/м ³ | После облучения в канале ВО-7 ядер/м ³ | После облучения в канале ВЭК-8 ядер/м ³ |
|---------|----------------------------------|---|--|
| Na | $8,83 \cdot 10^{26}$ | $9,83 \cdot 10^{26}$ | $7,68 \cdot 10^{25}$ |
| Mg | $1,28 \cdot 10^{26}$ | $1,28 \cdot 10^{26}$ | $8,16 \cdot 10^{25}$ |
| Al | $4,66 \cdot 10^{27}$ | $4,67 \cdot 10^{27}$ | $4,64 \cdot 10^{27}$ |
| Si | $1,79 \cdot 10^{28}$ | $1,79 \cdot 10^{28}$ | $1,79 \cdot 10^{28}$ |
| K | $2,33 \cdot 10^{26}$ | $7,34 \cdot 10^{26}$ | $7,33 \cdot 10^{26}$ |
| Ca | $6,90 \cdot 10^{25}$ | $6,90 \cdot 10^{25}$ | $6,90 \cdot 10^{25}$ |
| Fe | $2,78 \cdot 10^{25}$ | $2,78 \cdot 10^{25}$ | $2,78 \cdot 10^{25}$ |
| O | $4,37 \cdot 10^{28}$ | $4,39 \cdot 10^{28}$ | $4,39 \cdot 10^{28}$ |
| Ti | - | $3,73 \cdot 10^{20}$ | - |
| P | - | $8,86 \cdot 10^{24}$ | $8,16 \cdot 10^{21}$ |
| Sc | - | $1,79 \cdot 10^{20}$ | $4,64 \cdot 10^{19}$ |
| Mn | - | $2,90 \cdot 10^{20}$ | $1,12 \cdot 10^{21}$ |
| Co | - | $3,57 \cdot 10^{19}$ | $4,62 \cdot 10^{19}$ |
| Cr | - | $2,30 \cdot 10^{19}$ | - |
| Ne | - | $8,10 \cdot 10^{20}$ | - |

Анализ поведения заряженной частицы в диэлектрике в переменном электрическом поле можно теоретически проводить на основе дифференциального уравнения вынужденных колебаний с затуханием:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{qE_0 e^{i\omega t}}{m}, \quad (1)$$

где первое слагаемое левой части характеризует инерционную составляющую, действующую на частицу с зарядом q и массой m и вызывающую ее смещение на расстояние x при наличии препятствующего этому смещению внутреннего трения, определяемого вторым слагаемым левой части, и квазиупругой силой, возвращающей частицу в исходное состояние, определяемой третьим слагаемым. Вынуждающей силой выступает переменное электрическое напряжение $qE_0 e^{i\omega t}$.

Смещение заряда q на расстояние x приводит к образованию индуцированного электрического момента:

$$\mu = q \cdot x \quad (2)$$

и создает поляризованность

$$P = n \cdot q \cdot x \quad (3)$$

Решение уравнения (1) в этом случае для поляризуемости было дано [2] в виде:

$$\alpha_i = \alpha_i' + i\alpha_i'' = \frac{q_i^2}{m_i} \left[\frac{\omega_{0i}^2 - \omega^2}{(\omega_{0i}^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2} + i \frac{2\beta\omega}{(\omega_{0i}^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2} \right] \quad (4)$$

При постоянном напряжении ($\omega = 0$) и в установившемся состоянии ($\omega \ll \omega_0$):

$$\alpha_i' = \frac{q_i^2}{m_i \omega_{0i}^2} \quad \text{и} \quad \alpha_i'' = 0. \quad (5)$$

Для резонансной частоты в случае релаксационных колебаний используется соотношение [3]:

$$\omega_{0i}^2 = \frac{q_i^2}{\pi \cdot R_i^3 \cdot \epsilon_\infty \cdot \epsilon_0 \cdot m_i}, \quad (6)$$

где R_i – линейные размеры области релаксационных колебаний; ϵ_∞ – диэлектрическая проницаемость, определяемая упругими видами поляризации; q_i , m_i – заряд и масса релаксирующего иона.

Учитывая выражения (5) и (6) для области частот $\omega \ll \omega_0$, можно получить:

$$\alpha_i' = \pi \cdot R_i^3 \cdot \epsilon_\infty \epsilon_0. \quad (7)$$

Коэффициент затухания β может быть определен из удельной объемной электропроводности (УОЭП) γ . Электропроводность, если она обеспечивается одним видом носителей (ионов), описывается дифференциальным уравнением:

$$m \left(\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{1}{\tau} \frac{dx}{dt} \right) = qE, \quad (8)$$

т.е. уравнение (1) без третьего слагаемого в левой части, которое характеризует действие квазиупругой силы. Так как в этом случае нет возвращающей силы, то движение имеет характер протекания и заряженная частица может совершать сквозное движение от электрода к электроду, обеспечивая проводимость диэлектрика. В результате для проводимости было получено выражение [4]:

$$\gamma = n \frac{Z^2 e^2 \tau}{m_i}, \quad (9)$$

где $\tau = \frac{1}{2\beta}$ – время, в течение которого поле постоянного напряжения действует на носителей заряда

Ze в промежутке их перехода между ближайшими положениями равновесия; n – концентрация носителей заряда.

Таким образом, получаем окончательное выражение для коэффициента затухания:

$$2\beta = n \frac{Z^2 e^2}{\gamma \cdot m_i} \quad (10)$$

При вычислении коэффициента затухания по результатам измерения УОЭП следует иметь в виду, что проводимость обычно обеспечивается несколькими видами носителей заряда (ионы, электроны). В нашем случае для материала со щелочной алюмосиликатной стеклофазой проводимость обеспечивается ионами натрия. Определение чисел переноса по методу Тубандта для фарфора М-23 показало, что его проводимость целиком определяется ионами натрия [4], энергия активации которых примерно равна 1 эВ в высокотемпературной области и 0,5 эВ – в низкотемпературной области. Величина УОЭП для М-23 при 20°C равна $1,4 \cdot 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Учитывая, что при 20°C концентрация слабосвязанных ионов натрия в фарфоре М-23 при энергии активации 1 эВ будет $2,89 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а при 0,5 эВ – $3,24 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$, коэффициент затухания примет значения:

$$2\beta = \frac{n_{Na} \cdot q^2}{\gamma \cdot m_{Na}} = 0,25 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}, \quad (11)$$

т.е. $\beta = 0,13 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ при энергии активации ионов натрия 1 эВ и $\beta = 0,8 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}$ – при энергии активации 0,5 эВ.

Резонансная частота для фарфора М-23, рассчитанная по формуле (6) при ϵ_∞ для ИК - области частот 6,146, $R_i = 1,79 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ и $m(\text{Na}) = 3,81 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$, равна:

$$\omega_0^2 = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2}{3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot (1,79 \cdot 10^{-10} \text{ м})^3 \cdot 6,146 \cdot 3,81 \cdot 10^{-26} \text{ кг}} = 6,8597 \cdot 10^{26} \text{ с}^{-2}$$

Откуда $\omega_0 = 2,619 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$.

Диэлектрическую проницаемость и коэффициент диэлектрических потерь фарфора М-23 до облучения можно рассчитать по приведенным формулам [5]:

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{2 n_{Na} \cdot \alpha'}{3 \varepsilon_0} \quad (12)$$

$$\varepsilon'' = \frac{2 n_{Na} \cdot \alpha''}{3 \varepsilon_0} \quad (13)$$

Для расчета поляризуемости α' при $\omega \ll \omega_0$ воспользуемся выражением (7):

$$\alpha'_i = 3,14 \cdot (1,79 \cdot 10^{-10} \text{ м})^3 \cdot 6,146 \cdot \varepsilon_0 = 1,1068 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3 \cdot \varepsilon_0.$$

Подставляя значение α' в выражение (12), получим:

$$\varepsilon' = 6,146 + \frac{2}{3} \cdot \frac{8,83 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3} \cdot 1,1068 \cdot 10^{-28} \text{ м}^{-3} \cdot \varepsilon_0}{\varepsilon_0} = 6,146 + 0,06515 = 6,2111.$$

Таким образом, вклад релаксационной составляющей на резонансной частоте $\omega_0 = 2,619 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ в значение диэлектрической проницаемости ε' составляет $\Delta\varepsilon' = 0,06515$. Рассчитанная величина диэлектрической проницаемости ε' с учетом всех видов упругой поляризации – электронной и ионной, а также с учетом релаксационной поляризации – дает значение $\varepsilon' = 6,2111$, что соответствует экспериментально полученному значению ε' на частоте 10^6 Гц ($\varepsilon' = 6,5 \div 7$).

В области резонансной частоты натрия ($\omega_0 = 2,619 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$) значение действительной части диэлектрической проницаемости в соответствии с выражениями (4) и (12) можно рассчитать по формуле:

$$\varepsilon' = 6,146 + \frac{2}{3} \cdot \frac{8,83 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}}{8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}} \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2}{3,82 \cdot 10^{-26} \text{ кг}} \cdot \frac{6,86 \cdot 10^{26} \text{ с}^{-2} - \omega^2}{(6,86 \cdot 10^{26} \text{ с}^{-2} - \omega^2)^2 - 4 \cdot (0,13 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1})^2 \cdot \omega^2}$$

На рис. 1 показана зависимость диэлектрической проницаемости ε' от частоты в области релаксационных колебаний для электрофарфора М-23 в исходном состоянии.

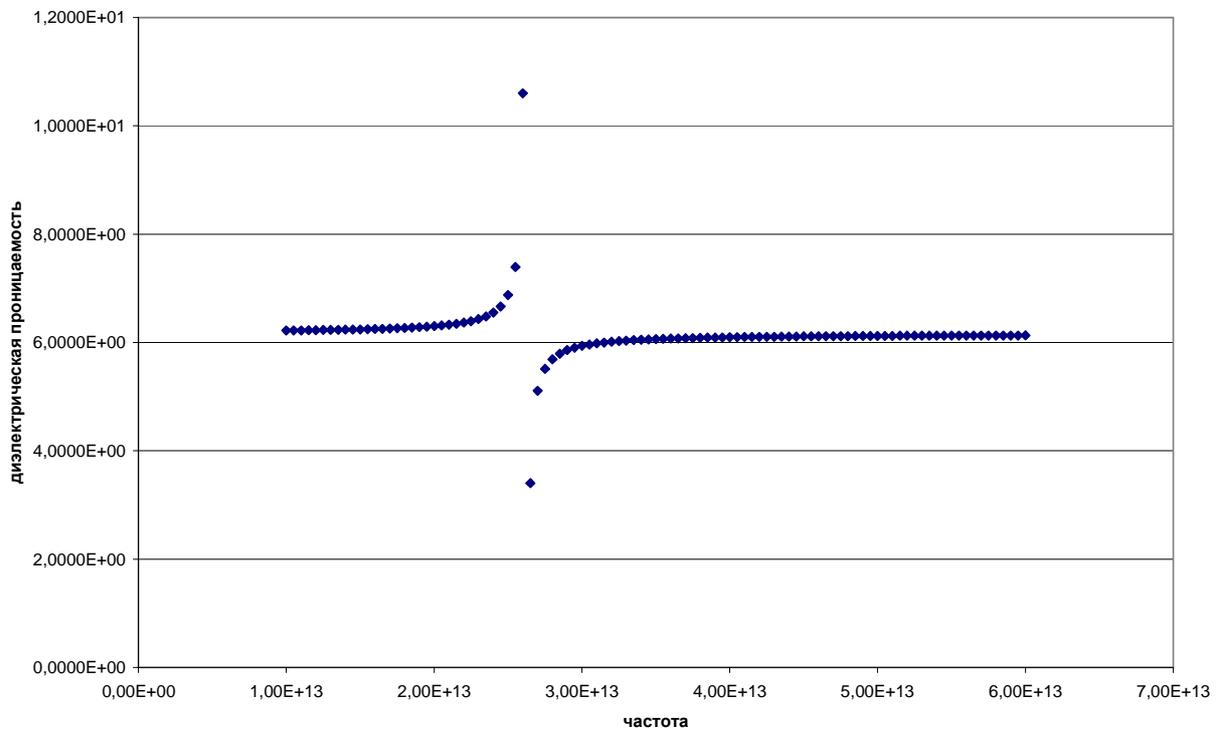


Рис. 1. Зависимость ε' от частоты для электрофарфора М-23 в исходном состоянии.

Коэффициент диэлектрических потерь ε'' можно определить в соответствии с выражениями (4) и (12) по формуле:

$$\varepsilon'' = \frac{2}{3} \cdot \frac{8,83 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}}{8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}} \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2}{3,82 \cdot 10^{-26} \text{ Кл}^2} \cdot \frac{2 \cdot 0,13 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1} \cdot \omega}{(6,86 \cdot 10^{26} \text{ с}^{-2} - \omega^2)^2 - 4 \cdot (0,13 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1})^2 \cdot \omega^2}.$$

На резонансной частоте ($\omega = \omega_0$) значение мнимой составляющей поляризуемости в соответствии с выражением (7) равно:

$$\alpha'' = \frac{q_i}{2m_i \beta \omega_0} = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2}{2 \cdot 3,82 \cdot 10^{-26} \text{ Кл}^2 \cdot 0,13 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1} \cdot 2,619 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}} = 9,841 \cdot 10^{-19} \text{ Ф} \cdot \text{м}^2.$$

Тогда на резонансной частоте натрия в исходном состоянии электротехнического фарфора М-23 коэффициент диэлектрических потерь равен:

$$\varepsilon'' = \frac{2}{3} \cdot \frac{8,83 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3} \cdot 9,841 \cdot 10^{-19} \text{ Ф} \cdot \text{м}^2}{8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}} = 6,5456 \cdot 10^{19}.$$

После облучения в канале ВО-7, как видно из таблицы 2, в составе фарфора образовалось 7 новых элементов: Ti, P, Sc, Mn, Ca, Cr и Ne, а после облучения в канале ВЭК-8 образовалось только 4 новых элемента с заметной концентрацией: P, Sc, Mn, Co. Так как образовавшиеся новые элементы теряют химическую связь со своими исходными партнерами, то можно полагать, что они окажутся слабосвязанными в твердом теле и будут участвовать в релаксационной диэлектрической поляризации.

Для расчета вклада релаксационной диэлектрической поляризации в значение диэлектрической проницаемости ε' после облучения в канале ВО-7 учитывались элементы с концентрацией более 10^{20} ядер/м³ – Ti, P, Sc, Mn. Элементы с меньшими концентрациями в расчете ε' не учитывались. Для канала ВЭК-8 учитывались только два новых элемента – P и Mn.

Предполагая, что область релаксации для фарфора после облучения не изменилась и осталась на уровне $R = 1,79 \cdot 10^{-10}$ м, в соответствии с формулой (6) можно рассчитать резонансные частоты для новых слабосвязанных ионов в фарфоре. Результаты вычислений приведены в табл. 3.

Таблица 3

Резонансные частоты слабосвязанных ионов с заметной концентрацией в М-23 после облучения

| Элемент | Валентность | m_i 10^{-26} кг | ω_{0i} 10^{13} с ⁻¹ |
|---------|-------------|------------------------|--|
| P | 5 | 5,1452 | 4,8389 |
| Sc | 2 | 7,4678 | 2,5406 |
| Mn | 2 | 9,1259 | 2,2983 |
| Ti | 4 | 9,7895 | 3,4797 |

Диэлектрическую проницаемость с учетом вклада в релаксационную поляризацию трансмутантов можно определить:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{2 \sum n_i \alpha_i'}{3 \varepsilon_0} + \frac{2 \sum n_i^* \alpha_i'^*}{3 \varepsilon_0}. \quad (14)$$

Тогда после облучения в канале ВО-7 получим:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{2 n_{Na} \alpha'_{Na}}{3 \varepsilon_0} + \frac{2}{3 \varepsilon_0} (n_P \alpha_P + n_{Sc} \alpha_{Sc} + n_{Mn} \alpha_{Mn} + n_{Ti} \alpha_{Ti}). \quad (15)$$

Если принять, что область релаксации R после облучения не изменилась и осталась для трансмутантов такой же, как и для натрия, определяющего релаксационную поляризацию до облучения, то в соответствии с выражением (7) поляризуемость всех вновь образованных при облучении элементов остается постоянной и одинаковой с исходным релаксатором (натрием в случае фарфора М-23). Тогда изменение значения диэлектрической проницаемости ε' после облучения, при исключе-

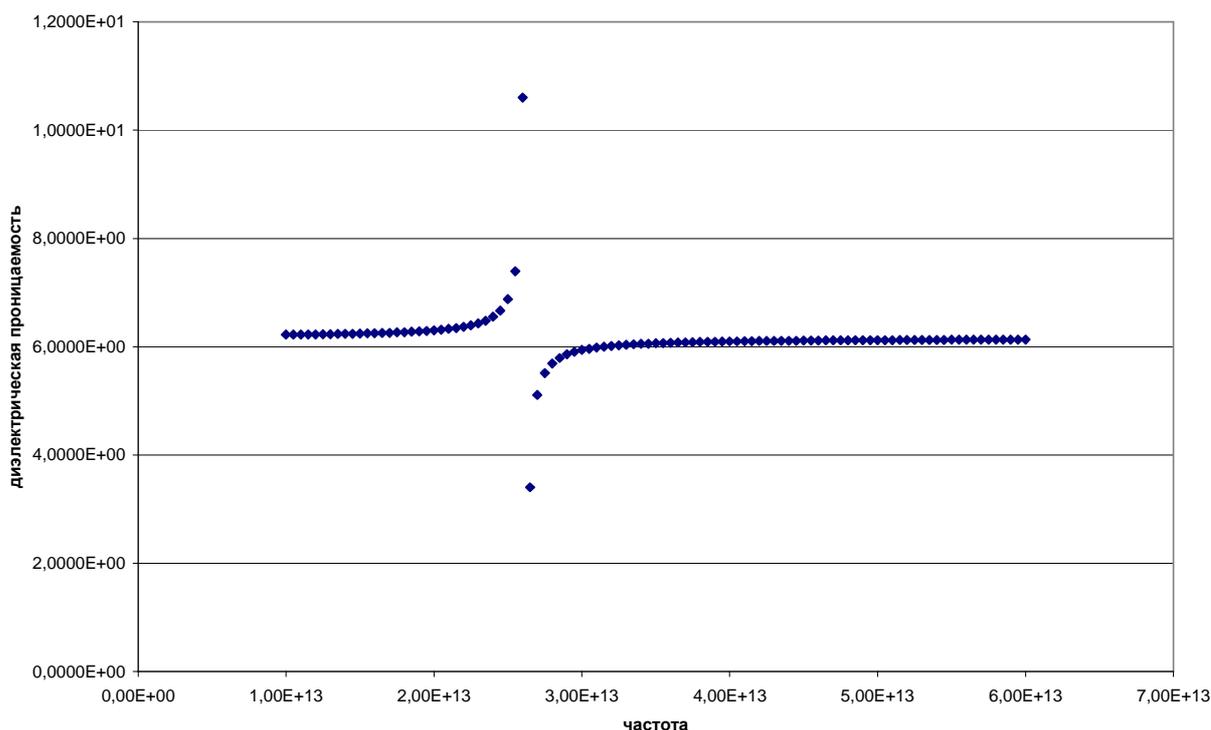
нии области дисперсии в соответствии с выражением (15), будет определяться количеством трансмутантов. Учитывая, что после облучения для М-23 $\epsilon_\infty = 6,593$, получим:

$$\begin{aligned} \epsilon' &= \epsilon_\infty + \frac{2}{3} \frac{n_{Na} \alpha'_{Na}}{\epsilon_0} + \frac{2}{3} \frac{\alpha'}{\epsilon_0} (n_P + n_{Sc} + n_{Mn} + n_{Ti}) = \epsilon_\infty + \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha'}{\epsilon_0} (n_{Na} + n_P + n_{Sc} + n_{Mn} + n_{Ti}) = \\ &= 6,593 + \frac{2}{3} \cdot \frac{9,7952 \cdot 10^{-40} \Phi \cdot M^2}{8,85 \cdot 10^{-12} \Phi / M} \cdot (9,83 \cdot 10^{26} M^{-3} + 3,73 \cdot 10^{20} M^{-3} + 8,86 \cdot 10^{24} M^{-3} + 1,79 \cdot 10^{20} + \\ &+ 2,90 \cdot 10^{20} M^{-3}) = 6,6662. \end{aligned}$$

Таким образом, в установившемся состоянии заметный вклад в величину диэлектрической проницаемости на уровне 1% дают изотопы фосфора. Суммарный вклад трансмутантов в значение диэлектрической проницаемости электротехнического фарфора М-23 после облучения в канале ВО-7 составил $\Delta\epsilon' = 0,0732$. Вклад трансмутантов в значение ϵ' после облучения в канале ВЭК-8 будет еще менее заметным. Такое изменение диэлектрической проницаемости после облучения не является технически значимым и укладывается в технологический разброс на частоте 1 МГц. Однако в результате нейтронного облучения после появления в керамическом диэлектрике трансмутантов увеличивается количество областей нелинейной дисперсии, что может привести к более существенному нагреванию образца в процессе его эксплуатации.

На рис. 2 представлена зависимость диэлектрической проницаемости М-23 после облучения в канале ВО-7 реактора БОР-60.

Рис. 2. Зависимость ϵ' от частоты для электрофарфора М-23 после облучения в канале ВО-7.



Как видно из рисунка, заметное изменение ϵ' после облучения происходит на резонансной частоте натрия ($\omega_0 = 2,619 \cdot 10^{13} \text{с}^{-1}$), причем более существенное, чем в исходном состоянии, что объясняется увеличением концентрации ионов натрия в исследуемом образце после облучения. Незначительный всплеск значений диэлектрической проницаемости наблюдается и на резонансной частоте фосфора ($\omega_0 = 4,8389 \cdot 10^{13} \text{с}^{-1}$). На резонансных частотах Ti, Sc, Mn величина ϵ' заметно не меняется, что объясняется малой концентрацией данных трансмутантов в М-23 после облучения.

Коэффициент диэлектрических потерь ε'' , определяемый поляризационными процессами, в установившемся режиме ($\omega \ll \omega_0$) определяется потерями проводимости $\varepsilon'' = \frac{\gamma}{\varepsilon_0 \cdot \omega}$ и так как обыч-

но после облучения электропроводность мало меняется, то и определяемый ею коэффициент потерь не меняется. Для оценки возможного влияния реакторного и космического излучения на изменение оптических и диэлектрических свойств керамических материалов необходимо прогнозировать возможное изменение химического состава вещества при длительной эксплуатации в условиях нейтронного облучения.

-
1. Выдрик, Г.А., Костюков, Н.С. Физико-химические основы производства и эксплуатации электрокерамики. – М.: Энергия, 1971. – 328 с.
 2. Костюков, Н.С., Лукичев, А.А., Муминов, М.И., Атраш, С.М., Скрипников, Ю.С. / под общ. ред. Н.С. Костюкова. Диэлектрики и радиация. – Кн. 2: ε и $\text{tg}\delta$ при облучении. – М.: Наука, 2002.
 3. Костюков, Н.С., Лукичев, А.А. Диэлектрические свойства керамики на основе Al_2O_3 в области релаксационной поляризации // Электричество. – 1999. – № 3. – С. 44-47.
 4. Костюков, Н.С., Муминов, М.И., Атраш, С.М. и др. / под общ. ред. Н.С. Костюкова. Диэлектрики и радиация. – Кн. 1: Радиационная электропроводность. – М.: Наука, 2001.
 5. Костюков, Н.С., Соколова, С.М., Демчук, В.А., Колпащикова, Ж.В. Зависимость диэлектрических характеристик электротехнического фарфора от частоты // Перспективные материалы. – 2010. – № 4.
 6. Талызин, В.В. Электроизоляционные свойства неорганических диэлектриков при облучении гамма-нейтронным потоком: Дис. ...канд. техн. наук. – М, 1971.
 7. Романов А.М. Нейтроны в атмосфере – М.: Знание, 1968. – 22 с.
 8. Дворецкий, М.М., Михайлов, М.М., Косицин, Л.Г. и др. Влияние электронного облучения на изменение поглощательной способности некоторых терморегулирующих покрытий // Радиационная стойкость полимерных и полимеросодержащих материалов в условиях космоса. Сб. науч. трудов НИИТХИМ. – М, 1979. – С. 66-71.