

УДК 678.5

А. М. МАГЕРРАМОВ, М. М. КУЛИЕВ, Н. Ш. АЛИЕВ, Р. С. ИСМАЙЛОВА, М. Н. БАЙРАМОВ, И. И. АББАСОВ

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ γ -ИЗЛУЧЕНИЕМ КОМПОЗИТОВ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ /ZnO

Из гомогенной смеси порошков полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) и окиси цинка (ZnO) методом горячего прессования получены композиты ПЭВП/ZnO. Показано, что с увеличением концентрации ZnO в матрице от 3 до 20 об.% уменьшение ε'' и $\tan \delta$ в зависимости от частоты отвечает экспоненциальному закону и это объясняется присутствием ряда дипольных элементов, которые появляются при добавлении ZnO, полученного методом термического прессования.

Выявлено, что в интервале температур 293–373K и частот 10²Гц–1кГц существует два основных релаксационных процесса. При температуре 293K на частоте 1кГц наблюдается максимум β -процесса. При более высоких температурах 323K ($\nu=5 \cdot 10^2$ Гц) и 373K ($\nu=10^2$ Гц) проявляется α -процесс. При увеличении температуры эти максимумы смещаются к более низким частотам.

Установлено, что выявленные изменения частотной зависимости после γ -облучения дозой 100кГр композита ПЭВП+5об.% ZnO возникающие при стабилизации частиц ZnO в матрице зависят от проводимости, и показано, что исследованным образцам свойственен целый спектр времен релаксации от $\tau = 4,3 \cdot 10^{-5}$ до $\tau = 1,9 \cdot 10^{-4}$ сек.

Диэлектрические процессы, наблюдаемые при высоких температурах (373K), характеризуются увеличением ε' и ε'' в области низких частот, что может быть объяснено ростом проводимости композита ПЭВП+5об.% ZnO.

Ключевые слова: композит, диэлектрические потери, диэлектрическая проницаемость, электропроводность, частота, релаксация, γ -облучение, поляризация.

З гомогенної суміші порошків поліетилену високої щільності (ПЕВЩ) і окису цинку (ZnO) методом гарячого пресування отримані композити ПЕВЩ / ZnO. Показано, що зі збільшенням концентрації ZnO в матриці від 3 до 20 об.% зменшення ε'' і $\tan \delta$ в залежності від частоти відповідає експоненціальному закону і це пояснюється присутністю ряду дипольних елементів, які з'являються при додаванні ZnO, отриманого методом термічного пресування.

Виявлено, що в інтервалі температур 293–373K і частот 10²Гц–1кГц існує два основних релаксацийних процеси. При температурі 293K на частоті 1 кГц спостерігається максимум α -процесу. При більш високих температурах 323K ($\nu=5 \cdot 10^2$ Гц) і 373K ($\nu=10^2$ Гц) проявляється α -процес. При збільшенні температури ці максимуми зміщуються до більш низьких частот.

Встановлено, що виявлені зміни частотної залежності після γ -опромінення дозою 100кГр композиту ПЕВЩ + 5об.% ZnO виникають при стабілізації частинок ZnO в матриці залежать від провідності, і показано, що дослідженим зразкам властивий цілий спектр часів релаксації від $\tau = 4,3 \cdot 10^{-5}$ до $\tau = 1,9 \cdot 10^{-4}$ сек.

Діелектричні процеси, які спостерігаються при високих температурах (373K), характеризуються збільшенням ε' і ε'' в області низьких частот, що може бути пояснено зростанням провідності композиту ПЕВЩ + 5об.% ZnO.

Ключові слова: композит, діелектричні втрати, діелектрична проникність, електропровідність, частота, релаксація, γ -опромінення, поляризація.

From homogeneous mixture of high-density polyethylene (HDPE) and zinc oxide (ZnO) it has been obtained HDPE/ZnO composites by hot pressing method. It is shown that with an increase in the concentration of ZnO in the matrix from 3 up to 20 vol.%, the decrease in ε'' and $\tan \delta$ depending on frequency corresponds to exponential law and is explained by the presence of a number of dipole elements which appear during the addition of ZnO and obtain by thermal pressing method.

It has been revealed that within the temperature range of 293–373K and frequency range of 102Hz – 1kHz there are two main relaxation processes. Maximum of β -process is observed at 293K temperature and 1kHz frequency. At higher temperatures 323 and 373K and frequencies 5-102Hz and 102Hz there appears α -process. Within temperature increasing, these maxima shift to lower frequencies.

It has been established that after γ -irradiation of HDPE+5vol.%ZnO composite with a dose of 100kGy, there have been revealed changes in the frequency dependence which appear within the stabilization of ZnO particles in the matrix and shown that the whole spectrum of relaxation time from $\tau = 4,3 \cdot 10^{-5}$ to $\tau = 1,9 \cdot 10^{-4}$ sec is characteristic for the studied sample.

Dielectric processes observed at high temperatures (373K) are characterized by an increase in ε' and ε'' at lower frequency ranges which can be explained by an increase in the conductivity of HDPE+5vol.%ZnO composite.

Keywords: composite, dielectric loss, dielectric permittivity, electrical conductivity, frequency, relaxation, γ -irradiation, polarization

Введение. В последние годы исследования в области создания материалов со специальными и практически важными электрофизическими свойствами на основе полимерных композитов, содержащих микро- и наночастицы оксидов металлов значительно расширились. Разработан комплекс методов, позволяющий формировать наночастицы в полимерной матрице [1–3]. Такие композиты обладают рядом необычных и перспективных в прикладном отношении электрофизических и оптических свойств, отличительной радиационной устойчивостью, что делает их пригодными для использования в качестве базовых материалов при разработке новых сенсоров [4–6], фотоэлектрических преобразователей, различного типа датчиков, пьезоматериалов и т.д. [5, 6]. Отметим, что полимерные композиционные материалы (ПКМ), содержащие

дисперсные частицы, в том числе ZnO представляют большой интерес для низковольтных и коротковолновых оптоэлектронных устройств, таких, как свето- и лазерные диоды, оптически управляемые химические сенсоры. Однако, расширение практического применения ПКМ ограничивается отсутствием детальной информации об адгезии между частицами и матрицей и иными возможными взаимодействиями между фазами, образовании граничного слоя и кластерообразовании, механизме переноса носителей заряда, роли границы раздела фаз, электронно-ионных и поляризационных процессов в формировании их активных свойств. В этой связи, при разработке новых ПКМ необходимо иметь информацию о температурной и частотной дисперсии действительной (ε') и мнимой (ε'') частей комплексной диэлектрической проницае-

© А. М. Магеррамов, М. М. Кулиев, Н. Ш. Алиев, Р. С. Исмаилова, М. Н. Байрамов, И. И. Аббасов. 2017

мости (ϵ), тангенс угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg}\delta$), удельной электропроводности на постоянном (σ_{dc}) и переменном (σ_{ac}) полях и основных закономерностях изменения параметров спектра диэлектрической релаксации в нанокompозитах [6]. Несмотря на рост числа экспериментальных работ, посвященных изучению вышеуказанных процессов, в полимерных микро- и нанокompозитах [11–17] данный вопрос по-прежнему остается малоизученным. В этой связи исследование диэлектрических свойств и электропроводности композита ПЭВП+ZnO в широком температурном и частотном диапазоне представляется актуальным.

Можно отметить также, что ПКМ находят применение в космической и атомной промышленности. Изучение влияния различных внешних факторов (температуры, частоты внешнего электрического поля, разных видов облучения – γ -излучение и т.д.) на диэлектрические, оптические, магнитные и другие их свойства является одной из важных исследовательских работ.

С целью поиска возможностей управления свойствами в модифицированных γ -излучением композитных материалов на основе микрочастиц ZnO в матрице ПЭВП в настоящей работе было проведено экспериментальное исследование частотного поведения диэлектрических свойств и электропроводности.

Экспериментальная часть. В качестве матрицы был выбран порошкообразный ПЭВП марки 20806–024, со средней молекулярной массой 95000, степенью кристалличности – 52 %. Выбор ПЭВП как матрицы был продиктован в основном хорошими диэлектрическими свойствами и технологичностью материала. Наполнителем служил порошкообразный полупроводник ZnO ($\rho=5,6\text{ г/см}^3$, $\rho_v=1\cdot 10^8\text{ Ом}\cdot\text{см}$, $\epsilon=8,5$, $E_g=3,36\text{ эВ}$).

При изготовлении пленочных образцов из ПЭВП и композитов ПЭВП+ZnO применялась технологическая схема, использующая операции:

- получение путем просеивания через сито порошков ZnO с размерами частиц не более 30 мкм;
- сушка на протяжении 24 ч при $T=373\text{ К}$ и смешивание в фарфоровой ступке порошкообразного ZnO с порошком ПЭВП;
- прессование гомогенной смеси порошков компонентов в гидравлическом прессе с нагреваемыми плитами при давлении 15 МПа с выдержкой при температуре 423 К в течение 5 мин и получение образцов композитов в виде дисков диаметром 15 мм и толщиной $140\div 180\text{ мкм}$ по методике [7].

Исследование диэлектрических параметров данных материалов проводилось на плоских конденсаторах по двухэлектродной системе в эквивалентной схеме параллельно соединенных резистора и конденсатора в диапазоне частот $25 - 10^6\text{ Гц}$ при температуре 293 К и амплитуде измерительного напряжения $U=1\text{ В}$ с применением специальной экранированной и заземленной обогреваемой измерительной ячейки типа «сэндвич», имеющей систему измерительного и потенциального электродов с диаметрами 10 и 15 мм соответственно.

Измерение емкости C , тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$, σ_{ac} – проводимости σ_{ac} в перемен-

ных полях осуществлялось в направлении, перпендикулярном плоскости прессования образцов с помощью широкополосного прецизионного измерителя иммитанса типа Е7–20. Затем на основании измеренных значений указанных параметров определялись величины действительной ϵ' ($\epsilon' = C \cdot d / \epsilon_0 S$, где S – площадь плоского образца, d – толщина пленки) и мнимой ϵ'' ($\epsilon'' = \epsilon' \operatorname{tg}\delta$) частот комплексной диэлектрической проницаемости измерительной ячейки с образцом. Пленочные образцы композитов подвергали γ -излучению при комнатной температуре на установке МРХ- γ -25 источником излучения ^{60}Co . Мощность поглощенной дозы $3,3\cdot 10^3\text{ Гр/ч}$. Для образцов ПЭВП+(3–20%)ZnO поглощенная доза $D=100\text{ кГр}$. При данной дозе наблюдается оптимальное упрочнение композитов на основе ПЭВП [7].

Результаты и их обсуждение. Результаты исследования частотных зависимостей ϵ' , ϵ'' и $\operatorname{tg}\delta$ композитов ПЭВП+ZnO с различным объемным содержанием наполнителя ZnO до и после γ -облучения ($D=100\text{ кГр}$) при комнатной температуре приведены на рис. 1, а, б и рис. 2, а, б.

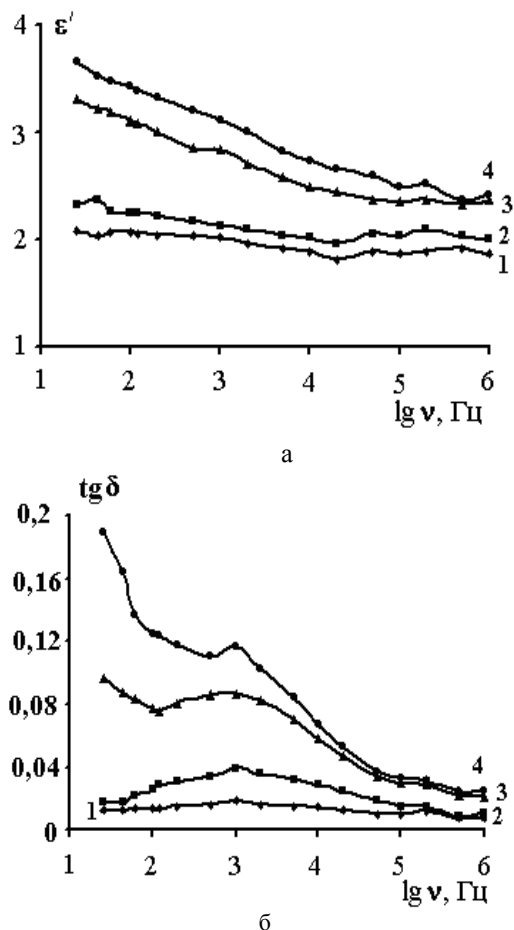


Рис. 1. Зависимость: а – диэлектрической проницаемости (ϵ') композитной системы ПЭВП+ZnO от частоты (v) $\epsilon' = f(\lg v)$ при температуре 293 К для различного объемного содержания наполнителя ZnO. 1–3об.%; 2–5об.%; 3–10об.%; 4–20об.%; б – тангенса угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg}\delta$) композитной системы ПЭВП+ZnO от частоты (v) $\operatorname{tg}\delta = f(\lg v)$ при температуре 293 К для различного объемного содержания наполнителя ZnO. 1–3об.%; 2–5об.%; 3–10об.%; 4–20об.%

Характерное для композитов с концентрацией 3, 5, 10 и 20 об.% ZnO первоначальное уменьшение ϵ' и $\text{tg}\delta$ при увеличении частоты до $10^4 \div 2 \cdot 10^4$ Гц отвечает экспоненциальному закону (рис. 1, а). Такое поведение ϵ' и ϵ'' композитов авторами [9] объясняется присутствием ряда дипольных элементов (напр., в нашем случае СО группы), которые появляются во время получения методом термопрессования и обработки материала в результате частичного термоокисления и их способностью ориентироваться под действием электрического поля. Кроме этого авторы [9] отмечают, что обычно молекулярные группы, расположенные перпендикулярно относительно поперечной цепи полимера вносят собственный вклад в механизм диэлектрической релаксации. При низких частотах приложенного напряжения все свободные дипольные элементы в композите легко ориентируются по полю (ориентационная поляризация) и формируют высокие значения диэлектрической проницаемости при этих частотах. При высоких частотах дипольные элементы не успевают за полем, их ориентация затрудняется, осцилляция замедляется и ориентационная поляризация исчезает, что приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости. С другой стороны [13], диэлектрическая проницаемость микрочастиц ZnO также уменьшается с ростом частоты электрического поля. Эти два фактора в основном, и приводят к уменьшению диэлектрической проницаемости композитов ПЭВП+ZnO с ростом частоты электрического поля. Таким образом, практически постоянное значение диэлектрической проницаемости при высоких частотах обуславливается только межфазной поляризацией Максвелла–Вагнера [20]. В этой области кинетика процесса характеризуется долговременной релаксацией.

На рис. 1, б. приведена зависимость тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) композитной системы ПЭВП+ZnO от частоты (ν) $\text{tg}\delta=f(\lg\nu)$ при температуре 293К для различного объемного содержания наполнителя ZnO. Как видно из рисунка (рис. 1, б) при объемном содержании наполнителя ZnO 3 и 5 об.% (кривые 1 и 2) и интервале частот 25–1 кГц $\text{tg}\delta$ возрастает, проходит через максимум при 1 кГц (β -релаксационный пик) и экспоненциально уменьшается в сторону высоких частот. Нужно отметить, что такое поведение ϵ' , ϵ'' и $\text{tg}\delta$, как отмечалось выше, может быть связано с ориентацией диполей в электрическом поле, механизмом процесса диэлектрической релаксации, объемной проводимостью, а также как и в нашем случае с природой и объемным содержанием наполнителя, вводимого в полимер.

На рис. 2, а, б приведены зависимости $\epsilon'=f(\lg\nu)$, $\text{tg}\delta=f(\lg\nu)$ и $\epsilon''=f(\lg\nu)$ модифицированные γ -излучением композитной системы ПЭВП+ZnO.

Если сравнить рис. 1, а и 2, а, то можем увидеть, что облучение оказывает существенное влияние на композитную систему ПЭВП+ZnO. В образцах 3 и 5 об.% ход зависимости $\epsilon'=f(\lg\nu)$ прямолинейный, значение ϵ' для всех частот практически стабильно. А в образцах 10 и 20 об.% значение ϵ' снижается экспоненциально в сторону высоких частот. Если мы посмотрим на рис. 2, б, то увидим, что в 20 об.%-ном

образце после облучения зависимости $\text{tg}\delta=f(\lg\nu)$ и $\epsilon''=f(\lg\nu)$ экспоненциально снижаются. После сравнения выясняется, что влияние дозы облучения для каждого образца индивидуально.

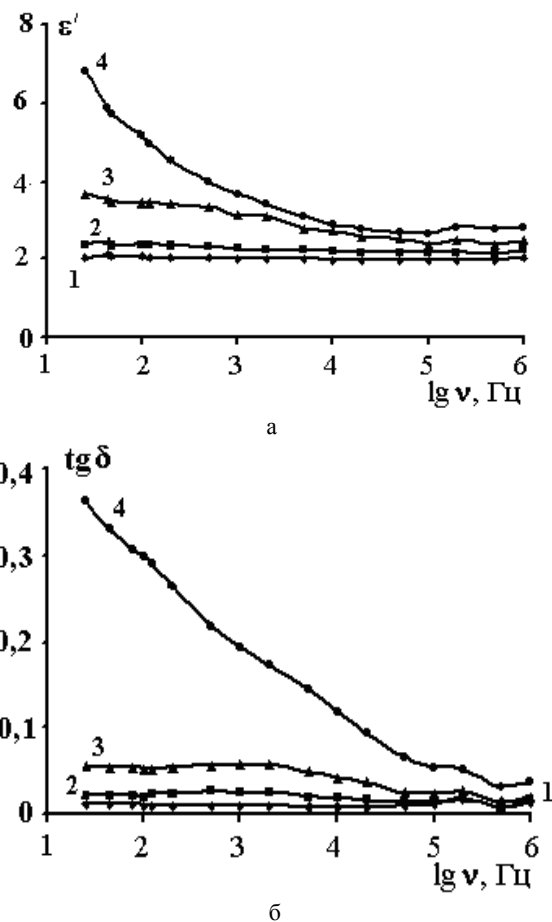


Рис. 2. Зависимость: а – диэлектрической проницаемости (ϵ') композитной системы ПЭВП+ZnO от частоты (ν) $\epsilon'=f(\lg\nu)$ при облучении дозой $D=100\text{кГр}$ для различного объемного содержания наполнителя ZnO. 1–3 об.%; 2–5 об.%; 3–10 об.%; 4–20 об.%; б – тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) композитной системы ПЭВП+ZnO от частоты (ν) $\text{tg}\delta=f(\lg\nu)$ при облучении дозой $D=100\text{кГр}$ для различного объемного содержания наполнителя ZnO. 1–3 об.%; 2–5 об.%; 3–10 об.%; 4–20 об.%.

Предполагаем, что наблюдающееся при γ -облучении 100кГр некоторое увеличение электрической проводимости обусловлено ионизацией. Ионизация поставляет способные к перемещению заряды (свободные электроны и положительные ионы), которые могут принимать участие в процессе проводимости. По мнению авторов [7, 16] дозовые эффекты являются прямым следствием образования как свободных радикалов R^* , так и их участие в реакции $R^*+e^- \rightarrow R$ прорекомбинации между собой (e^- стабилизированные электроны) с образованием характерных пострадиационных изменений в структуре полимера. Кроме того, наблюдающееся при γ -облучении некоторое увеличение электрической проводимости исследованных образцов, можно связать с процессами сшивки полимерных цепей, приводящими к образованию трехмерной структуры, а дальнейшее ее снижение – с процессами окислительной деструкции. Авто-

ры [16–18] утверждают, что электропроводность полиэтиленовой матрицы обусловлена носителями заряда, которые появляются при γ -облучении, а не зарядами, инжектированными из электродов. С ростом дозы облучения растет и концентрация захваченных электронов: чем больше доза облучения, тем больше число носителей заряда. Отметим, что рост дозы облучения приводит и к уменьшению отношения кристаллической фазы к аморфной и, тем самыми по 3-х фазной модели кристаллизующихся полимеров [14, 21] обуславливает уменьшение площади границы раздела фаз. Вследствие этого уменьшается плотность концентрации глубоких ловушек на границе раздела фаз.

На рис. 3, а, б представлена частотная зависимость после γ -облучения при различных (293, 323, 373 К) температурах $\epsilon' = f(\lg \nu)$ и $\epsilon'' = f(\lg \nu)$ в исследуемых образцах ПЭВП+5об.% ZnO.

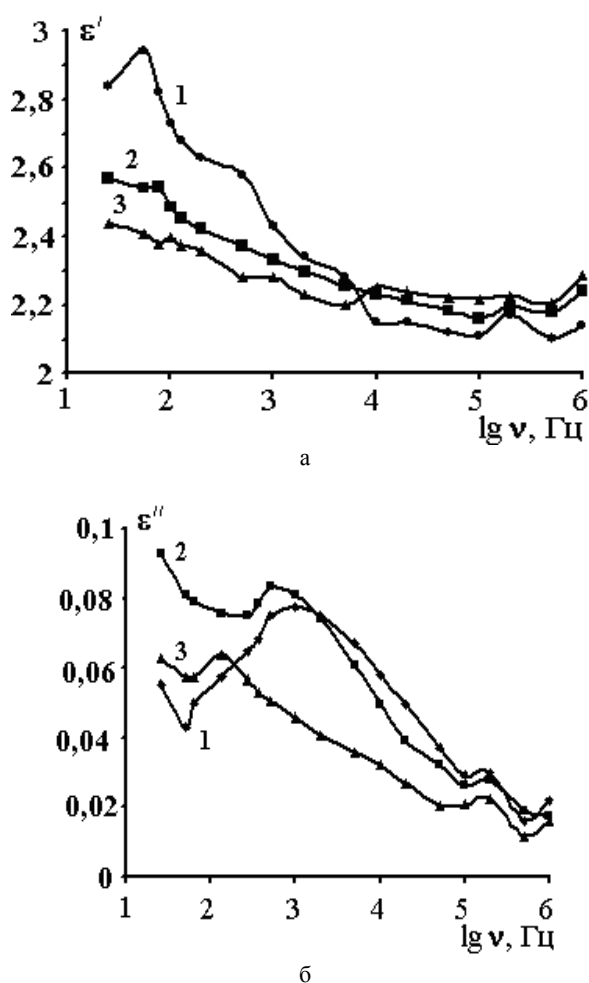


Рис. 3. Зависимость: а – диэлектрической проницаемости от частоты $\epsilon' = f(\lg \nu)$ после γ -облучения в исследуемых образцах ПЭВП+5об.% ZnO. при различных температурах (1–293 К, 2–323 К и 3–373 К); б – мнимой составляющей диэлектрической проницаемости от частоты $\epsilon'' = f(\lg \nu)$ после γ -облучения в исследуемых образцах композита ПЭВП+5об.% ZnO при различных температурах (1–293 К, 2–323 К и 3–373 К)

Как видно из рис. 3, а в зависимости $\epsilon' = f(\lg \nu)$ при температуре $T = 293$ К (кривая 1) значение диэлектрической проницаемости при низкой частоте 25 Гц возрастает ($\sim 2,84$) и экспоненциально снижается в

сторону интервала высоких частот. Можно также отметить, что для значений температур 323 К и 373 К при низких частотах значение ϵ' составляет $\sim 2,57$ и $\sim 2,44$ (кр. 2 и 3). Отметим, что такой характер изменения диэлектрической проницаемости материала при изменении температуры может быть объяснен с помощью механизма, в котором микрочастицы ZnO, стабилизированные в объеме полиэтиленовой матрицы, рассматривают как точечные источники тепловой генерации носителей заряда. При этом нагрев материала ведет к повышению концентрации носителей, сосредоточенных в микрочастицах наполнителя и преодолению ими потенциального барьера на межфазной границе, после чего носители могут быть захвачены молекулой полимера, вызывая повышение ее поляризуемости и в итоге диэлектрическая проницаемость материала растет. Диэлектрические процессы, наблюдаемые при высоких температурах (373 К и выше) в композитах с концентрацией наполнителя ZnO 5,10 и 20 об.% характеризуются увеличением ϵ'' , что может быть объяснено возрастанием проводимости композита [9].

Как видно из рисунка (рис. 3, б) в указанном интервале температур и частот существует два основных релаксационных процесса. При температуре 293 К на частоте 1 кГц наблюдается максимум β -процесса. При более высоких температурах 323 К и 373 К и частотах $5 \cdot 10^2$ Гц и 10^2 Гц проявляется α -процесс. Из рис. 3, а и б видно, что при увеличении температуры эти максимумы смещаются к более низким частотам. Можно отметить тенденцию к увеличению диэлектрической проницаемости ϵ' и диэлектрических потерь $\lg \delta$ с ростом температуры, которая особенно заметно выражена на низких частотах. Диэлектрические процессы, наблюдаемые при высоких температурах (373 К), характеризуются увеличением ϵ'' в области низких частот, что может быть объяснено проводимостью композита ПЭВП+5об.% ZnO. На рис. 4, а видно, что возрастание диэлектрической проницаемости с ростом температуры при низких частотах в композите ПЭВП+5об.% ZnO обусловлено инжекцией электронов и накоплением объемного заряда в композите [16, 17]. Следует отметить, что при повышении температуры постепенно активизируются различные типы молекулярных движений и связанных с ними диполей. В этом случае наблюдается высокотемпературный α -процесс, связанный с микроброуновским движением полимерных цепей, а также по крайней мере еще один низкотемпературный процесс (β , γ и т. д.). Относительная интенсивность α - и β -процессов определяется степенями ориентации дипольных групп, допускаемыми ограниченной подвижностью β -процесса и большей подвижностью α -процесса: каждый процесс молекулярной перестройки связан с определенным уровнем ориентации дипольных моментов [20].

В приведенной зависимости $\epsilon'' = f(\lg \nu)$ при температурах 293, 323, 373 К и соответствующих частотах 10^3 , $5 \cdot 10^2$, 10^2 Гц, зависимости времен релаксаций наблюдаемых максимумов рассчитывались методом приближения Дебая по формуле (1):

$$\tau = \epsilon'' / \omega (\epsilon_c - \epsilon_\infty), \quad (1)$$

где, ϵ'' – мнимая часть диэлектрической проницаемости, ω – круговая частота ($\omega = 2\pi\nu$), ϵ_c – статистическая диэлектрическая проницаемость, ϵ_∞ – диэлектрическая проницаемость при высокой частоте [19, 20]. Согласно расчетам $\tau_1 = 4,3 \cdot 10^{-5}$ (T=293 K, $\nu = 1$ кГц), $\tau_2 = 6 \cdot 10^{-5}$ (T=323 K, $\nu = 5 \cdot 10^2$ Гц), $\tau_3 = 1,9 \cdot 10^{-4}$ (T=373 K, $\nu = 10^2$ Гц) сек. Как видно из этих расчетов, при высоких температурах (323 и 373 K) время релаксации более высокое и это может быть связано с проводимостью композитной среды ПЭВП+5об.% ZnO.

Следует отметить, что изначально неполярный полимерный материал ПЭВП в результате частичного термоокисления при получении образцов и после стабилизации в нем частиц ZnO приобретает полярные свойства. Предполагаем, что полярные элементы в композитах возникают на границе раздела фаз в 3–х фазной структуре в системе частица–матрица.

Установлено, что с изменением частоты для композитной системы ПЭВП/ZnO до и после γ -облучения значение ϵ'' и сила дисперсии $\Delta\epsilon = \epsilon_0 - \epsilon_\infty$ (ϵ_0 и ϵ_∞ – соответственно низкочастотная и высокочастотные диэлектрические проницаемости) для

ПЭВП+5об.% ZnO уменьшаются в 1,27 и 1,33 раза соответственно. Отсутствие максимума диэлектрических потерь в частотной зависимости исследуемых композитов свидетельствует о слабой релаксационной поляризации в этих образцах (рис. 1, 2).

Выводы

1. Показано, что с увеличением концентрации ZnO в матрице уменьшение ϵ' , ϵ'' и $\text{tg}\delta$ в зависимости от частоты отвечает экспоненциальному закону и объясняется присутствием ряда дипольных элементов, которые появляются во время добавления ZnO и при термопрессовании.

2. Диэлектрические процессы, наблюдаемые при высоких температурах (373 K) характеризуются увеличением ϵ' и ϵ'' в области низких частот, что может быть объяснено изменением проводимостью композита ПЭВП+5об.% ZnO.

3. Установлено, что после γ -облучения композита ПЭВП+5об.% ZnO при дозах 100 кГр выявлено изменение времени релаксации от $\tau = 4,3 \cdot 10^{-5}$ до $\tau = 1,9 \cdot 10^{-4}$ сек. Изменение времени релаксации связано с увеличением проводимости данного композита при облучении.

Список литературы:

- Hussain, F. Review article: Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: An Overview [Text] / F. Hussain, M. Hoggati, M. Okamoto, R. E. Gorga // Journal of Composite Materials. – 2006. – Vol. 40, Issue 17. P. 1511–1575. doi: [10.1177/0021998306067321](https://doi.org/10.1177/0021998306067321)
- Ramanathan, T. Graphitic nanofillers in PMMA nanocomposites – An investigation of particle size and dispersion and their influence on nanocomposite properties [Text] / T. Ramanathan, S. Stankovich, D. A. Dikin, H. Liu, H. Shen, S. T. Nguyen, L. C. Brinson // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. – 2007. – Vol. 45, Issue 15. – P. 2097–2112. doi: [10.1002/polb.21187](https://doi.org/10.1002/polb.21187)
- Guo, N. Nanoparticle, Size, Shape, and Interfacial Effects on Leakage Current Density, Permittivity, and Breakdown Strength of Metal Oxide-Polyolefin Nanocomposites: Experiment and Theory [Text] / N. Guo, S. A. DiBenedetto, P. Tewari, M. T. Lanagan, M. A. Ratner, T. J. Marks // Chemistry of Materials. – 2010. Vol. 22, Issue 4. – P. 1567–1578. doi: [10.1021/cm902852h](https://doi.org/10.1021/cm902852h)
- Хныков, А. Ю. Влияние влажности воздуха над и электрический отклик нанокомпозитов поли-п-ксилилен/оксидтитана [Текст] / А. Ю. Хныков, С. А. Завьялов, Е. И. Григорьев, А. М. Лотонов, П. С. Воронцов, С. Н. Чвалун // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39, Вып. 20. – С. 15–22.
- Yang, D. Nanocomposite Films for Gas Sensing [Text] / D. Yang // Advances in Nanocomposites – Synthesis, Characterization and Industrial Applications. – 2011. – P. 857–882. doi: [10.5772/13887](https://doi.org/10.5772/13887)
- Гефле, О. С. Частотные спектры комплексной диэлектрической проницаемости композиционных диэлектриков на основе поливинилхлорида [Текст] / О. С. Гефле, С. М. Лебедев, Ю. П. Похолов // Изв. Томского политех. универ. – 2007. – Т. 310, № 1. – С. 87–91.
- Маггеррамов, А. М. Структурное и радиационное модифицирование электретных, пьезоэлектрических свойств полимерных композитов [Текст] / А. М. Маггеррамов. – Баку: ЭЛМ, 2001. – 327 с.
- Shamshad Aliyev, N. Features of Electroconductivity of γ -Irradiated Composites in Heating-Cooling Conditions [Text] / N. Shamshad Aliyev // American Journal of Physics and Applications. – 2015. – Vol. 3, Issue 2. – P. 15–20. doi: [10.11648/j.ajpa.20150302.11](https://doi.org/10.11648/j.ajpa.20150302.11)
- Алиев, Н. Ш. Электрофизические свойства композитной системы полиэтилен высокой плотности/ α -Fe₂O₃ [Текст] / Н. Ш. Алиев, А. М. Маггеррамов, М. М. Кулиев, Р. С. Исмаилова // Перспективные материалы. – 2014. – № 10. – С. 22–27.
- Li, Y. C. Frequency and Temperature Dependences of Dielectric Dispersion and Electrical Properties of Polyvinylidene Fluoride/Expanded Graphite Composites [Text] / Y. C. Li, R. K. Yiu Li, S. C. Tjong // Journal of Nanomaterials. – 2010. – Vol. 2010. – P. 1–10. doi: [10.1155/2010/261748](https://doi.org/10.1155/2010/261748)
- Tomer, V. Polyethylene nanocomposite dielectrics: Implications of nanofiller orientation on high field properties and energy storage [Text] / V. Tomer, G. Polyzos, C. A. Randall, E. Manias // Journal of Applied Physics. – 2011. – Vol. 109, Issue 7. – P. 074113. doi: [10.1063/1.3569696](https://doi.org/10.1063/1.3569696)
- Latif, I. Preparation, Characterization and Electrical Study of (Carboxymethylated Polyvinyl Alcohol/ZnO) Nanocomposites [Text] / I. Latif, E. E. AL-Abodi, D. H. Badri, J. Al Khafagi // American Journal of Polymer Science. – 2013. – Vol. 2, Issue 6. – P. 135–140. doi: [10.5923/j.ajps.20120206.01](https://doi.org/10.5923/j.ajps.20120206.01)
- Zhang, L. D. Dielectric behaviour of nano-TiO₂ bulks [Text] / L. D. Zhang, H. F. Zhang, G. Z. Wang, C. M. Mo, Y. Zhang // Physica Status Solidi (a). – 1996. – Vol. 157, Issue 2. – P. 483–491. doi: [10.1002/psa.2211570232](https://doi.org/10.1002/psa.2211570232)
- Abbas, R. A. Studing Some Dielectric Properties and Effective Parameters of Composite Materials Containing of Novolak Resin [Text] / R. A. Abbas // Journal of Engineering and Technology. – 2007. – Vol. 25, Issue 8. – P. 277–288.
- Гаврилова, Н. Д. Проблема линейной диэлектрической дисперсии в кристаллах и полимерах [Текст] / Н. Д. Гаврилова, А. М. Лотонов, А. А. Давыдова // ВМУ. Физика. Астрономия. – 2013. – № 1. – С. 45–51.
- Тютнев, А. П. Радиационная электропроводность полимеров при длительном облучении [Текст] / А. П. Тютнев, В. С. Саенко, И. А. Смирнов, Е. Д. Пожидов // Химия высоких энергий. – 2006. – Т. 40, № 5. – С. 364–375.
- Chen, G. The effects of gamma-irradiation on thermally stimulated discharge current spectra in low-density polyethylene [Text] / G. Chen, R. A. Fouracre, H. M. Banford, D. J. Tedford // International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry. – 1991. – Vol. 37, Issue 3. – P. 523–530. doi: [10.1016/1359-0197\(91\)90030-6](https://doi.org/10.1016/1359-0197(91)90030-6)
- Magerramov, A. M. Structural aspects of the radiation modification of the dielectric properties of polyolefins [Text] / A. M. Magerramov, M. K. Dashdamirov // High Energy Chemistry. – 2005. – Vol. 39, Issue 3. – P. 142–147. doi: [10.1007/s10733-005-0030-5](https://doi.org/10.1007/s10733-005-0030-5)
- Ушаков, Н. М. Термодиэлектрические свойства полимерных композитных наноматериалов на основе медь-оксид меди в матрице по-

- лиэтилена высокого давления [Текст] / Н. М. Ушаков, А. Н. Ульзутуев, И. Д. Кособудский // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78, № 12. – С. 65–69.
20. Сажин, Б. И. Электрофизические свойства полимеров [Текст] / Б. И. Сажин, А. М. Лобанов и др.; под ред. Б. И. Сажина. – Л.: Химия, 1986. – 224 с.
21. Смирнов, Ю. Н. Влияние γ -радиации на полимерные композиты на основе термопластичных матриц [Текст] / Ю. Н. Смирнов, С. Р. Алларов, В. А. Лесничая и др. // Химия высоких энергий. – 2009. – Т. 43, № 6. – С. 505–511.

Bibliography (transliterated):

- Hussain, F., Hojjati, M., Okamoto, M., Gorga, R. E. (2006). Review article: Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: An Overview. *Journal of Composite Materials*, 40 (17), 1511–1575. doi: [10.1177/0021998306067321](https://doi.org/10.1177/0021998306067321)
- Ramanathan, T., Stankovich, S., Dikin, D. A., Liu, H., Shen, H., Nguyen, S. T., Brinson, L. C. (2007). Graphitic nanofillers in PMMA nanocomposites – An investigation of particle size and dispersion and their influence on nanocomposite properties. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 45 (15), 2097–2112. doi: [10.1002/polb.21187](https://doi.org/10.1002/polb.21187)
- Guo, N., DiBenedetto, S. A., Tewari, P., Lanagan, M. T., Ratner, M. A., Marks, T. J. (2010). Nanoparticle, Size, Shape, and Interfacial Effects on Leakage Current Density, Permittivity, and Breakdown Strength of Metal Oxide-Polyolefin Nanocomposites: Experiment and Theory. *Chemistry of Materials*, 22 (4), 1567–1578. doi: [10.1021/cm902852h](https://doi.org/10.1021/cm902852h)
- Nhykov, A. Yu., Zavyalov, S. A., Grigoriev, E. I., Lotonov, A. M., Vorontsov, P. S., Chvalun, S. N. (2013). Influence of air humidity on a dielectric response of nanocomposites poly-n-xylylene/Titanium dioxide. *Tech. Phys. Lett.*, 39 (20), 15–22.
- Yang, D. (2011). Nanocomposite Films for Gas Sensing. *Advances in Nanocomposites – Synthesis, Characterization and Industrial Applications*, 857–882. doi: [10.5772/13887](https://doi.org/10.5772/13887)
- Gefle, O. S., Lebedev, S. M., Pokholkov, Yu. P. (2007). Frequency spectra of the complex permittivity of composite dielectrics on the basis of polyvinyl chloride. *Izv. Tomsk Politekh. Univer.*, 310 (1), 87–91.
- Magerramov, A. M. (2001). Structural and Radiation Modification of Electret, Piezoelectric Properties of Polymer Composites. Baku: ELM, 327.
- Shamshad Aliyev, N. (2015). Features of Electroconductivity of γ -Irradiated Composites in Heating-Cooling Conditions. *American Journal of Physics and Applications*, 3 (2), 15–20. doi: [10.11648/j.ajpa.20150302.11](https://doi.org/10.11648/j.ajpa.20150302.11)
- Aliyev, N. Sh., Magerramov, A. M., Kuliyeu, M. M., Ismayilova, R. S. (2014). Electrophysical properties of composite system polyethylene of high density/ α -Fe₂O₃. *Perspective materials*, 10, 22–27.
- Li, Y. C., Li, R. K. Y., Tjong, S. C. (2010). Frequency and Temperature Dependences of Dielectric Dispersion and Electrical Properties of Polyvinylidene Fluoride/Expanded Graphite Composites. *Journal of Nanomaterials*, 2010, 1–10. doi: [10.1155/2010/261748](https://doi.org/10.1155/2010/261748)
- Tomer, V., Polizos, G., Randall, C. A., Manias, E. (2011). Polyethylene nanocomposite dielectrics: Implications of nanofiller orientation on high field properties and energy storage. *Journal of Applied Physics*, 109 (7), 074113. doi: [10.1063/1.3569696](https://doi.org/10.1063/1.3569696)
- Latif, I., E. AL-Abodi, E., H. Badri, D., Al Khafagi, J. (2013). Preparation, Characterization and Electrical Study of (Carboxymethylated Polyvinyl Alcohol/ZnO) Nanocomposites. *American Journal of Polymer Science*, 2 (6), 135–140. doi: [10.5923/j.ajps.20120206.01](https://doi.org/10.5923/j.ajps.20120206.01)
- Zhang, L. D., Zhang, H. F., Wang, G. Z., Mo, C. M., Zhang, Y. (1996). Dielectric behaviour of nano-TiO₂ bulks. *Physica Status Solidi (a)*, 157 (2), 483–491. doi: [10.1002/pssa.2211570232](https://doi.org/10.1002/pssa.2211570232)
- Abbas, R. A. (2007). Studing Some Dielectric Properties and Effective Parameters of Composite Materials Containing of Novolak Resin. *Journal of Engineering and Technology*, 25 (8), 277–288.
- Gavrilova, N. D., Lotonov, A. M., Davydova, A. A. (2013). The problem of linear dielectric dispersion in crystals and polymers. *Moscow University Physics Bulletin. Physics and Astronomy*, 1, 45–51.
- Tyutnev, A. P., Saenko, V. S., Smirnov, I. A., Pozhidaev, E. D. (2006). Radiation-induced conductivity in polymers during long-term irradiation. *High Energy Chem.*, 40 (5), 364–375.
- Chen, G., Fouracre, R. A., Banford, H. M., Tedford, D. J. (1991). The effects of gamma-irradiation on thermally stimulated discharge current spectra in low-density polyethylene. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry*, 37 (3), 523–530. doi: [10.1016/1359-0197\(91\)90030-6](https://doi.org/10.1016/1359-0197(91)90030-6)
- Magerramov, A. M., Dashdamirov, M. K. (2005). Structural aspects of the radiation modification of the dielectric properties of polyolefins. *High Energy Chemistry*, 39 (3), 142–147. doi: [10.1007/s10733-005-0030-5](https://doi.org/10.1007/s10733-005-0030-5)
- Ushakov, N. M., Uluztuyev, A. N., Kosobudsky, I. D. (2008). Thermodielectric properties of polymer composite nanomaterials based on copper-copper oxide in high-density polyethylene matrix. *Technical Physics*, 78 (12), 65–69.
- Sazhin, B. I., Lobanov, A. M. et al.; Sazhin, B. I. (Ed.) (1986). *Electrophysical properties of polymers*. Leningrad: Khimiya, 224.
- Smirnov, Yu. N., Allayarov, S. R., Lesnichaya, V. A. et al. (2009). The effect of gamma-radiation on polymer composites based on thermoplastic matrices. *High Energy Chemistry*, 43 (6), 505–511.

Поступила (received) 06.12.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Диэлектрические свойства модифицированных γ -излучением композитов полиэтилена высокой плотности / ZnO/ Магеррамов А. М., Кулиев М. М., Алиев Н. Ш., Исмаилова Р. С., Байрамов М. Н., Аббасов И. И. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 44 (1266). – P.13–19. – Bibliogr.:21. – ISSN 2079-5459

Діелектричні властивості модифікованих γ -випромінюванням композитів поліетилену високої щільності / ZnO/ Магеррамов А. М., Кулієв М. М., Алієв Н. Ш., Ісмаїлова Р. С., Байрамов М. Н., Аббасов І. І. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 44 (1266). – P.13–19. – Bibliogr.:21. – ISSN 2079-5459

Dielectric properties of γ -radiation modified high-density polyethylene / ZnO composites / Maharramov A. M., Guliyev M. M., Aliyev N. Sh., Ismayilova R. S., Bayramov M. N., Abbasov I. I. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 44 (1266). – P.13–19. – Bibliogr.:21. – ISSN 2079-5459

Магеррамов Ариф Муса оглы – доктор физико–математических наук, профессор, заведующий лабораторией, специалист по диэлектрической и термоактивационной спектроскопии, физической химии и радиационного материаловедения, Институт Радиационных Проблем НАН Азербайджана, ул. Б. Вагабзаде, 9, г. Баку, Азербайджан, AZ1143, E-mail: arifm50@yandex.ru.

Кулиев Мусафир Мазахир оглы – кандидат физико–математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, специалист по диэлектрической и термоактивационной спектроскопии и радиационного материаловедения, Институт Радиационных Проблем НАН Азербайджана, ул. Б. Вагабзаде, 9, г. Баку, Азербайджан, AZ 1143, E-mail: musafir_g@rambler.ru.

Алиев Наби Шамшад оглы – диссертант, специализируется в области диэлектрической спектроскопии и радиационного материаловедения, младший научный сотрудник, Институт Радиационных Проблем НАН Азербайджана, ул. Б. Вагабзаде, 9, г. Баку, Азербайджан, AZ 1143, E-mail: nabi.aliyev.1958@mail.ru.

Исмайлова Рафига Солтан гызы – кандидат физико–математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, специалист по диэлектрической и термоактивационной спектроскопии и радиационного материаловедения, Институт Радиационных Проблем НАН Азербайджана, ул. Б. Вагабзаде, 9, г. Баку, Азербайджан, AZ 1143, E-mail: rafiq55@rambler.ru.

Байрамов Мазахир Насреддин оглы – доктор философии по физике, научный сотрудник, специалист по диэлектрической и термоактивационной спектроскопии и радиационного материаловедения, Институт Радиационных Проблем НАН Азербайджана, ул. Б. Вагабзаде, 9, г. Баку, Азербайджан, AZ 1143, E-mail: m.bayramov51@mail.ru.

Аббасов Ибрагим Иса оглы – кандидат физико–математических наук, доцент, специалист по экспериментальной ядерной физике, Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности, пр. Азадлыг, 20, г. Баку, Азербайджан, AZ 1010, E-mail: ibrahimabbasov179@gmail.com.

Магеррамов Ариф Муса оглы – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач лабораторією, фахівець з діелектричної і термоактиваційної спектроскопії, фізичної хімії та радіаційного матеріалознавства, Інститут радіаційних Проблем НАН Азербайджану, вул. Б. Вагабзаде, 9, м Баку, Азербайджан, AZ1143

Кулієв Мусафір Мазахир оглы – кандидат фізико-математичних наук, доцент, провідний науковий співробітник, фахівець з діелектричної і термоактиваційної спектроскопії і радіаційного матеріалознавства, Інститут радіаційних Проблем НАН Азербайджану, вул. Б. Вагабзаде, 9, м Баку, Азербайджан, AZ 1143,

лієв Набі Шамшад оглы – дисертант, спеціалізується в області діелектричної спектроскопії і радіаційного матеріалознавства, молодший науковий співробітник, Інститут радіаційних Проблем НАН Азербайджану, вул. Б. Вагабзаде, 9, м Баку, Азербайджан, AZ 1143, E-mail: nabi.aliyev.1958@mail.ru.

Ісмайілова Рафіг Солтан гизи – кандидат фізико-математичних наук, доцент, провідний науковий співробітник, фахівець з діелектричної і термоактиваційної спектроскопії і радіаційного матеріалознавства, Інститут радіаційних Проблем НАН Азербайджану, вул. Б. Вагабзаде, 9, м Баку, Азербайджан, AZ 1143,

Байрамов Мазахир Насреддін оглы – доктор філософії з фізики, науковий співробітник, фахівець з діелектричної і термоактиваційної спектроскопії і радіаційного матеріалознавства, Інститут радіаційних Проблем НАН Азербайджану, вул. Б. Вагабзаде, 9, м Баку, Азербайджан, AZ 1143, E-mail: m.bayramov51@mail.ru.

Аббасов Ібрагім Іса оглы – кандидат фізико-математичних наук, доцент, фахівець з експериментальної ядерної фізики, Азербайджанський державний університет Нафти і Промисловості, пр. Азадліг, 20, м Баку, Азербайджан, AZ 1010, E-mail: ibrahimabbasov179@gmail.com.

Maharramov Arif Musa oghlu – Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, Head of Laboratory, Specialist in Dielectric and Thermoactivation Spectroscopy, Physical Chemistry and Radiation Material Science, Institute of Radiation Problems, National Academy of Sciences of Azerbaijan, str. B. Vagabzade, 9, m Baku, Azerbaijan, AZ1143, E-mail: arifm50@yandex.ru.

Guliyev Musafir Mazahir oghlu – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Lead Researcher, Specialist in Dielectric and Thermoactivation Spectroscopy and Radiation Material Science, Institute of Radiation Problems, National Academy of Sciences of Azerbaijan, str. B. Vagabzade, 9, m Baku, Azerbaijan, AZ 1143, E-mail: musafir_g@rambler.ru.

Aliyev Nabi Shamshad oghlu – Dissertation specializing in the field of dielectric spectroscopy and radiation material science, junior researcher, Institute of Radiation Problems, National Academy of Sciences of Azerbaijan, str. B. Vagabzade, 9, m Baku, Azerbaijan, AZ 1143, E-mail: nabi.aliyev.1958@mail.ru.

Ismayilova Rafiq Soltan gizi – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Senior Researcher, Specialist in Dielectric and Thermoactivation Spectroscopy and Radiation Material Science, Institute of Radiation Problems, National Academy of Sciences of Azerbaijan, B. Vagabzade, str., 9, m Baku, Azerbaijan, AZ 1143, E-mail: rafiq55@rambler.ru.

Bayramov Mazahir Nasreddin oghlu – Doctor of Philosophy in Physics, Researcher, Specialist in Dielectric and Thermoactivation Spectroscopy and Radiation Materials Science, Institute of Radiation Problems, National Academy of Sciences of Azerbaijan, vul. B. Vagabzade, 9, m Baku, Azerbaijan, AZ 1143, E-mail: m.bayramov51@mail.ru.

Abbasov Ibragim Isa oghlu – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Experimental Nuclear Physics Specialist, Azerbaijan State University of Petroleum and Industry, Azadlig ave., 20, Baku, Azerbaijan, AZ 1010,