
Ю. А. Гороховатский, А. А. Гулякова, П. Фрюбинг

ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ В КОМПОЗИТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНКАХ НА ОСНОВЕ УДАРОПРОЧНОГО ПОЛИСТИРОЛА

(Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки
в рамках базовой части государственного задания)

Приведены результаты исследования процессов релаксации заряда в пленках ударопрочного полистирола (УПС) без наполнителя и с добавлением TiO_2 (рутил) методами термоактивационной и диэлектрической спектроскопии, динамического механического анализа (ДМА), а также дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Для композитных пленок характерна большая стабильность электретного состояния, которая определяется проводимостью по глубоким ловушкам носителей заряда, глубина которых определена при помощи метода регуляризирующих алгоритмов Тихонова и составляет для образцов УПС без наполнителя $W = 0.87 \pm 0.03$ эВ, а для композитных пленок лежит в пределах от 1.1 до 1.18 эВ. Данные диэлектрической спектроскопии и токов ТСД свидетельствуют о наличии в исследуемых образцах сквозной проводимости, перехода из стеклообразного состояния в высокоэластическое, а также выявляют релаксационный процесс, связанный с наличием полярных структур, который не оказывает влияния на стабильность электретного состояния в образцах.

Ключевые слова: ударопрочный полистирол, диэлектрическая спектроскопия, композитные пленки.

Yu. Gorokhovatskiy, A. Gulyakova, P. Frübing

THE ELECTRIC RELAXATION PROCESSES IN COMPOSITE HIGH-IMPACT POLYSTYRENE FILMS

The charge relaxation processes in pure high-impact polystyrene films (HIPS) and HIPS filled with titanium-dioxide (TiO_2 inclusions of rutile modification) are investigated by means of thermally-stimulated depolarization current (TSDC) measurements, dielectric relaxation spectroscopy (DRS), dynamic mechanical analysis (DMA) and differential scanning calorimetry (DSC). The thermal stability of the electret state of TiO_2 -filled HIPS films is significantly higher than that of pure HIPS and could be due to the charge-carrier transport through the deep traps that determines the conductivity. The depths of energy traps was determined by means of numerical methods based on the Tikhonov regularization technique (for pure HIPS $W = 0.87 \pm 0.03$ eV, for composite films $W = 1.1 \div 1.18$ eV). The DRS and TSDC results indicate the presence of the conductivity in HIPS films, the transition from glassy to rubbery state and the relaxation process, connected with the presence of the polar structures, which does not influence on the stability of the electret state.

Keywords: high-impact polystyrene, dielectric spectroscopy, composite films.

В работе исследовались пленки УПС толщиной 400 ± 50 мкм без наполнителя и с добавлением 2 и 4 об.% TiO_2 . Влияние наполнителя на температурную стабильность электретного состояния исследовалось при помощи метода термостимулированной релаксации поверхностного потенциала (ТСРПП). Электретное состояние в образцах формировалось в коронном разряде при комнатной температуре.

Диэлектрический спектр получен в температурном диапазоне $20 \div 180^\circ\text{C}$ и в диапазоне частот от 1°Гц до 1 МГц на оборудовании Novocontrol ALPHA high-resolution dielectric analyser и Novocontrol QUATRO cryosystem. Данные были получены в виде функции от частоты при линейном нагреве, на исследуемые образцы с обеих сторон были предварительно напылены электроды (Al, толщиной 50 нм, диаметром 12 мм).

Данные ДСК получены на оборудовании Perkin Elmer Pyris Diamond при скорости нагрева и охлаждения 20 К/мин .

Исследование механической релаксации проводилось при помощи динамического механического анализатора DMA 8000 в температурном диапазоне от $+20$ до $+160^\circ\text{C}$ на фиксированной частоте 1 Гц при скорости нагрева 1°C/мин и смещении $0,01 \text{ мм}$ (деформация растяжения).

Измерение токов термостимулированной деполяризации (ТСД) проводилось в режиме короткого замыкания при помощи чувствительного электрометра Keithley 6517. Исходные (без наполнителя) и композитные пленки (с предварительно нанесенными электродами Al) поляризовались при приложении электрического поля ($E_{n1} = 0,01 \text{ МВ/м}$, $E_{n2} = 1 \text{ МВ/м}$) в течение 10 минут при температуре поляризации $T_n = 110^\circ\text{C}$, превышающей температуру стеклования, характерную для исследуемых образцов. Охлаждение образцов до T_0 , соответствующей комнатной температуре T_k , проводилось в присутствии электрического поля со скоростью $\beta = 5 \text{ К/мин}$. Последующее измерение тока деполяризации проводилось в режиме линейного нагрева образца со скоростью $\beta = 1 \div 3 \text{ К/мин}$ при отсутствии внешнего электрического поля.

Термостимулированная релаксация поверхностного потенциала

На рисунке 1 приведены кривые спада поверхностного потенциала для пленок УПС без наполнителя для двух скоростей нагрева, образцы заряжались в поле положительного коронного разряда.

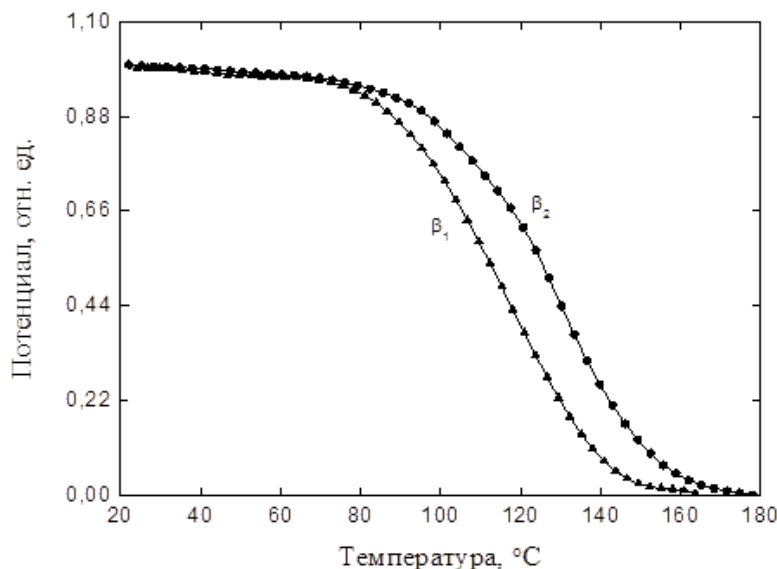


Рис. 1. Спад поверхностного потенциала для образцов УПС без наполнителя, заряженных в поле положительного коронного разряда (скорости нагрева $\beta_1 = 0,03 \text{ К/с}$, $\beta_2 = 0,092 \text{ К/с}$)

Кривая, соответствующая более высокой скорости нагревания, смещается в область более высоких температур (то есть скорость релаксации потенциала зависит от скорости нагревания), что позволяет сделать вывод, что процесс релаксации поверхностного потенциала в образцах имеет термоактивационную природу и соответствует теории термоактивационных процессов [1].

В исследуемых образцах не наблюдается зависимость характера спада поверхностного потенциала от знака коронного разряда (рис. 2).

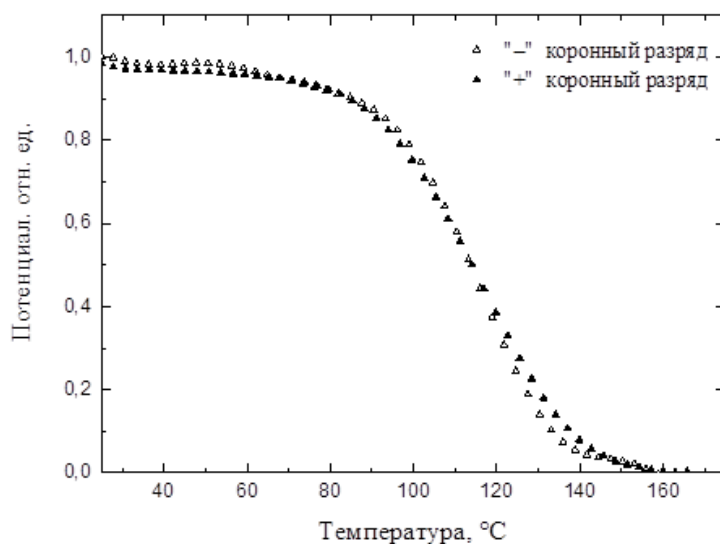


Рис. 2. Зависимость спада поверхностного потенциала от температуры для пленок УПС без наполнителя, заряженных в поле положительного и отрицательного коронного разряда (скорость нагрева $\beta = 0.03$ K/c)

Это позволяет предположить, что процессом, ответственным за стабильность электретного состояния в образцах, является перенос носителей заряда по ловушкам, определяющий проводимость. Для пленок УПС без наполнителя при помощи регуляризирующих алгоритмов Тихонова были определены параметры ловушек носителей заряда (энергия активации W и эффективный частотный фактор ω_s). Различные версии энергетического распределения ловушек, восстановленные по кривым ТСРПП для двух скоростей нагрева, представлены на рисунке 3.

Восстановленные энергетические спектры, полученные для двух разных скоростей нагрева, совпадают при значениях частотного фактора $\omega_s = 10^9$ с⁻¹ (погрешность определения частотного фактора не превышает полдекады), что соответствует энергии активации $W = 0.87 \pm 0.03$ эВ, версия функции распределения по энергии активации, восстановленная с таким частотным фактором, и является наиболее вероятной.

Кривые спада поверхностного потенциала для композитных пленок УПС представлены на рисунке 4.

Температурная стабильность электретного состояния в композитных пленках значительно выше, чем у исходных образцов [3]. Процедура восстановления энергетического спектра для образцов УПС с 4 об.% TiO_2 была проведена аналогичным образом с использованием регуляризирующих алгоритмов Тихонова. На рисунке 5, а приведена окончательная версия энергетического распределения для релаксационного процесса, отвечающего за

стабильность электретного состояния в композитных пленках, который, вероятнее всего, связан с проводимостью, обусловленной центрами захвата носителей заряда. Повышение содержания наполнителя в образцах сопровождается изменением энергетического спектра (рис. 5, б) и ведет к заметному повышению стабильности электретного состояния.

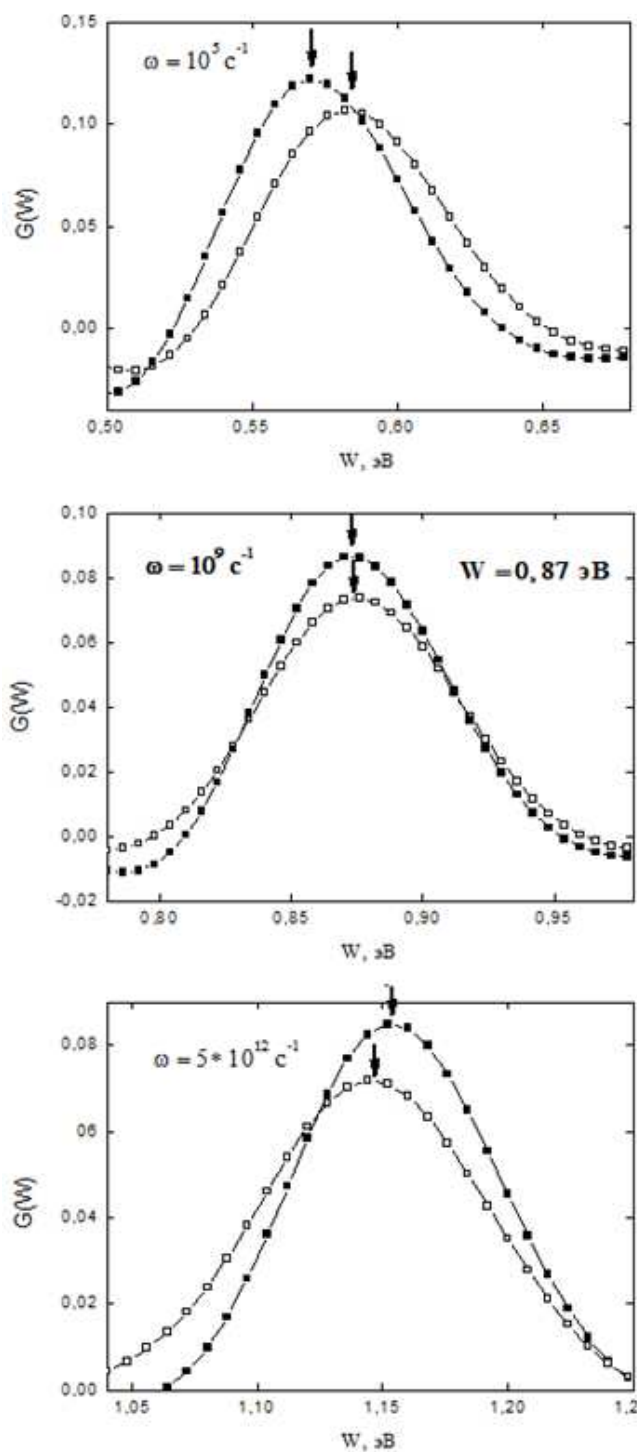


Рис. 3. Версии энергетического распределения ловушек, восстановленные по кривым ТСРПП для пленок УПС без наполнителя, при различном выборе значений частотного фактора

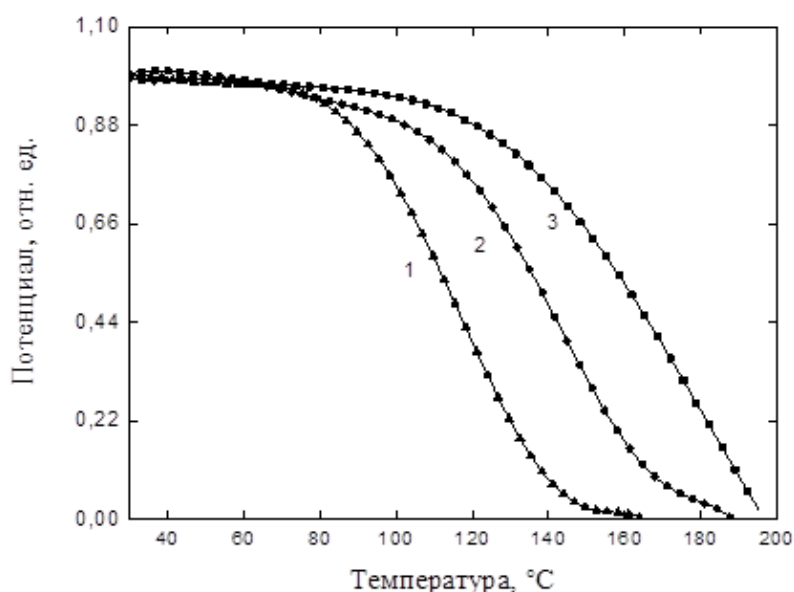


Рис. 4. Спад поверхностного потенциала для исходных и композитных пленок УПС, заряженных в поле положительного коронного разряда, скорость нагрева $\beta = 0.03$ К/с: 1 — чистый УПС, 2 — УПС с 2 об.% TiO_2 , 3 — УПС с 4 об.% TiO_2

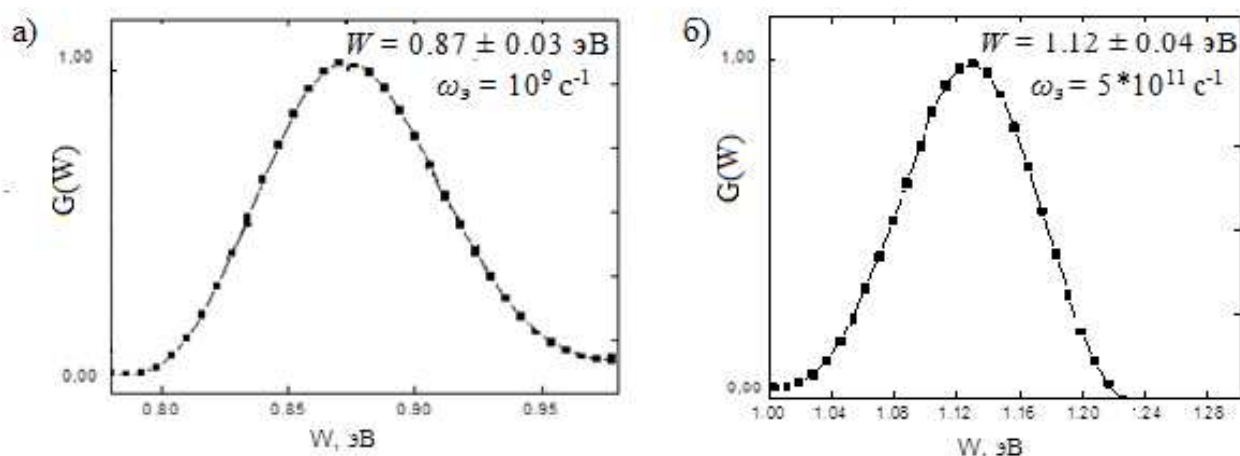


Рис. 5. Окончательная версия энергетического распределения: а — для пленок УПС без наполнителя; б — для композитных пленок с добавлением 4 об.% TiO_2

Значение энергии активации, определенное для композитных пленок с добавлением 4 об.% TiO_2 , составляет $W = 1.12 \pm 0.04$ эВ, $\omega_3 = 5 \times 10^{11}$ с⁻¹. Энергия активации процесса, отвечающего за стабильность электретного состояния, растет с увеличением объемного содержания рутила в образцах, то есть увеличивается глубина центров захвата носителей заряда, отвечающая за проводимость пленок при внесении наполнителя. Таким образом, внедрение наполнителя в полимерную матрицу способствует созданию глубоких ловушек для инжектированных носителей заряда (предположительно — на границе раздела сред полимер — наполнитель), что ведет к повышению стабильности электретного состояния в исследуемых пленках.

Диэлектрическая релаксация

Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ для образцов УПС без наполнителя в диапазоне температур $120 \div 150^\circ\text{C}$ приведена на рисунке 6. В низкочастотной области диэлектрического спектра (< 1 Гц) наблюдается нарастание $\tan \delta$ с уменьшением частоты, в этой области $\tan \delta$ прямо пропорционален проводимости (для всех образцов зависимость диэлектрической проницаемости от частоты остается постоянной) и обратно пропорционален частоте, а зависимость $\tan \delta = f(1/\omega)$ можно линеаризовать (рис. 7).

Линеаризация зависимости логарифма наклона кривых от обратной температуры позволяет рассчитать энергию активации сквозной проводимости (рис. 8). Полученное значение энергии активации $W = 0.86$ эВ находится в хорошем согласии со значением энергии, определенным по данным ТСРПП для исходных пленок УПС ($W = 0.87 \pm 0.03$ эВ).

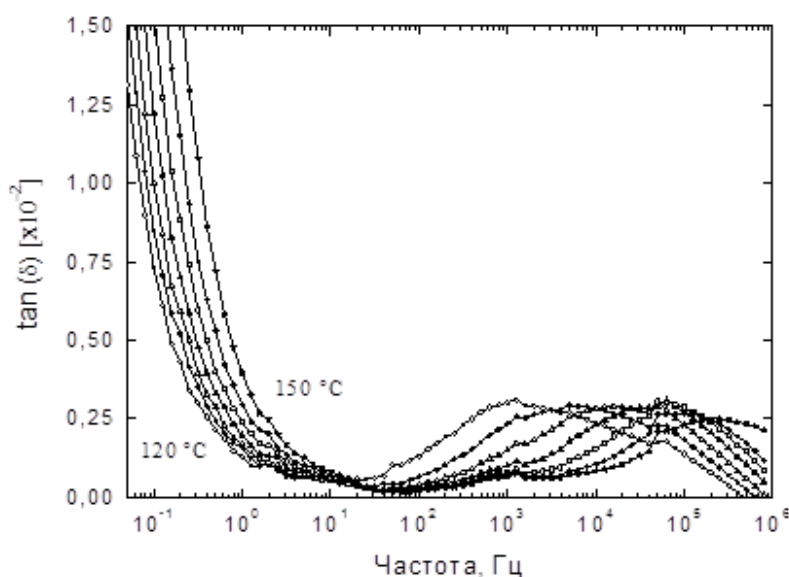


Рис. 6. Частотная зависимость $\tan \delta$ для пленок УПС без наполнителя в выбранном диапазоне температур (шаг по температуре 5 К)

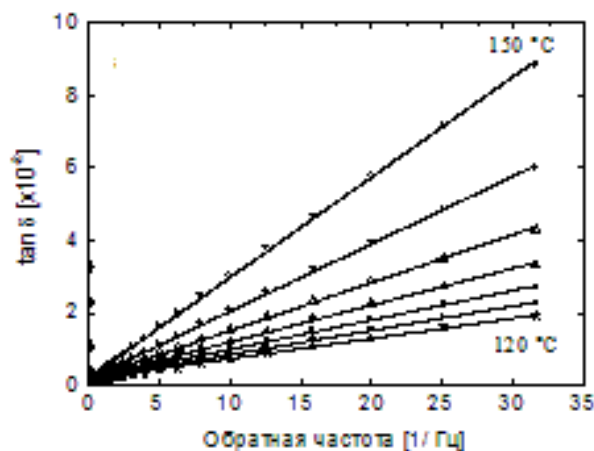


Рис. 7. Линеаризация зависимости фактора диэлектрических потерь от обратной частоты для образцов УПС без наполнителя

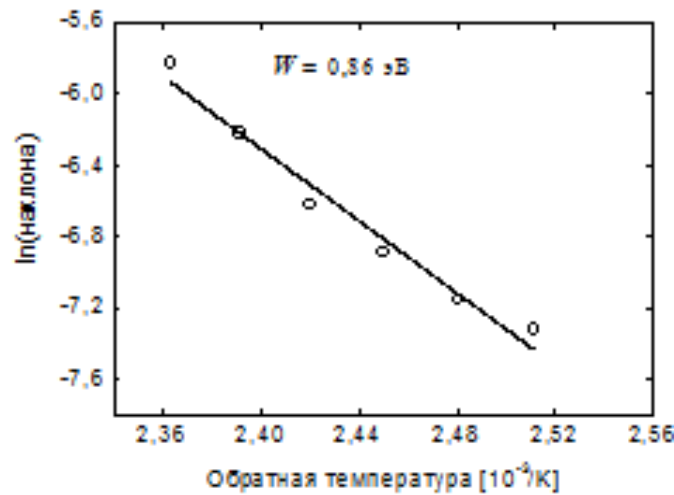


Рис. 8. Определение энергии активации сквозной проводимости для образцов УПС без наполнителя при помощи линеаризации зависимости логарифма наклона кривых от обратной температуры

Кроме того, на частотной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь наблюдается также пик, связанный с переходом вещества из стеклообразного в высокоэластическое состояние.

Для композитных образцов УПС с добавлением 4 об.% TiO_2 частотная зависимость $\tan \delta$ приведена на рисунке 9.

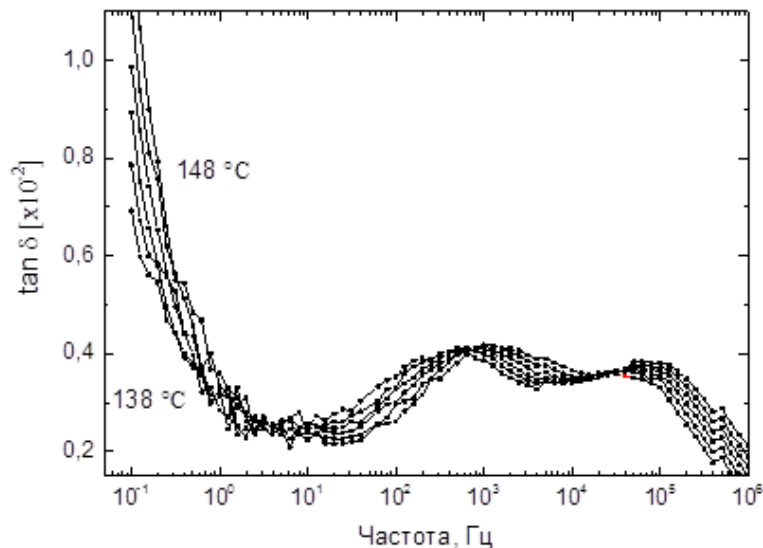


Рис. 9. Частотная зависимость $\tan \delta$ для композитных пленок УПС с 4 об.% TiO_2 в выбранном диапазоне температур (шаг по температуре 2 К)

В области низких частот (<1 Гц) также наблюдается рост диэлектрических потерь с уменьшением частоты. Для композитных пленок значение энергии активации проводимости было рассчитано также посредством линеаризации зависимости логарифма наклона кривых от обратной температуры (рис. 10) [5]. Значение энергии активации сквозной про-

водимости для образцов УПС с 4 об.% TiO_2 ($W = 1.1$ эВ, рис. 11) согласуется со значением энергии, определенным в п. 1 для композитных пленок по данным ТСРПП ($W = 1.12 \pm 0.04$ эВ).

На частотной зависимости диэлектрических потерь для композитных пленок (рис. 9), кроме низкочастотной области, наблюдаются еще два релаксационных процесса. Появление первого релаксационного процесса, вероятнее всего, обусловлено наличием наполнителя в образцах УПС.

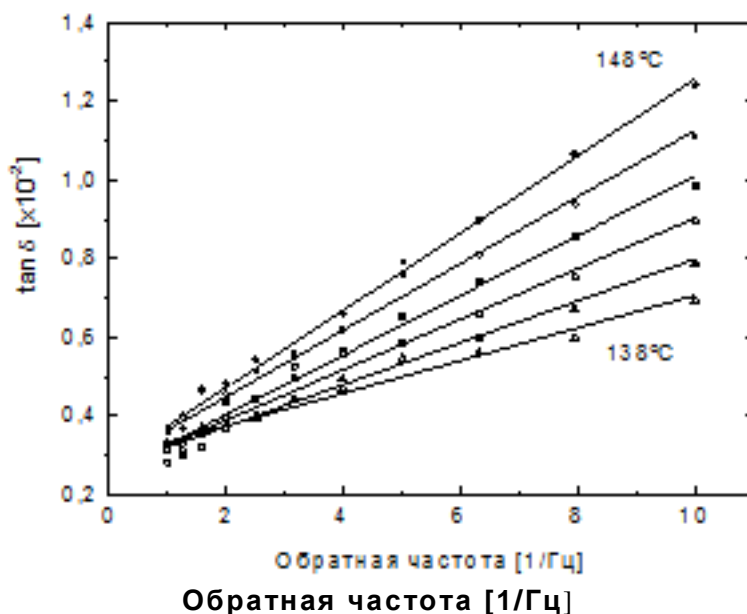


Рис. 10. Линеаризация зависимости фактора потерь от обратной частоты для образцов УПС с 4 об.% TiO_2

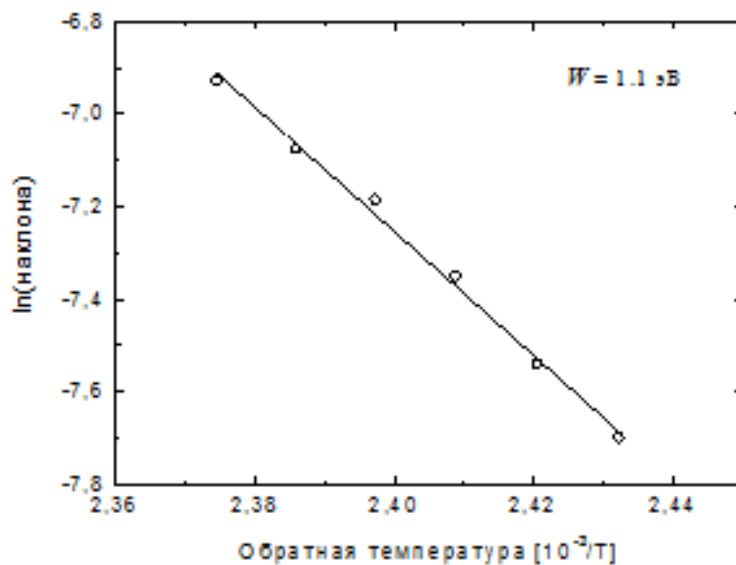


Рис. 11. Определение энергии активации проводимости для образцов УПС с 4 об.% TiO_2

На рисунке 12 приведена температурная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь для исходных и композитных пленок УПС, полученная на частоте 1 Гц.

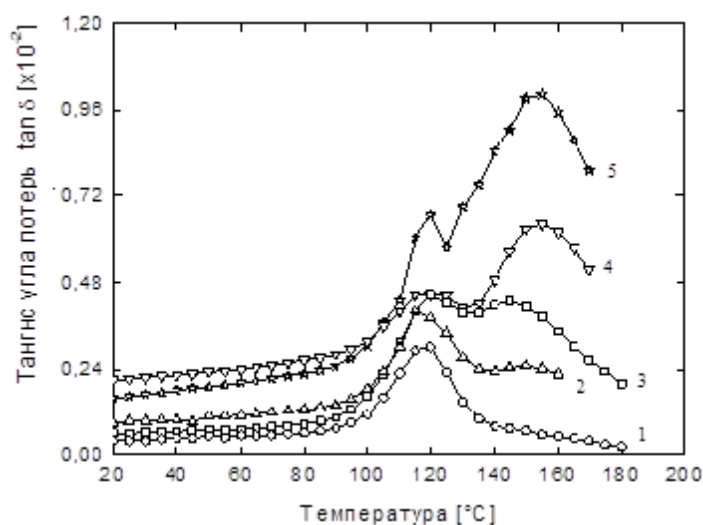


Рис. 12. Температурная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь на частоте 1 Гц для образцов чистого УПС и с различным содержанием TiO_2 (1 — чистый УПС, 2 — 2 об.%, 3 — 4 об.%, 4 — 6 об.%, 5 — 8 об.%)

Величина максимума второго высокотемпературного пика на температурной зависимости линейно зависит от концентрации наполнителя, что наглядно представлено на рисунке 13 (второму пику на температурной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь соответствует первый пик на частотном спектре). Энергия активации этого релаксационного процесса была также определена при помощи линейаризации зависимости логарифма частоты пика от обратной температуры. Частотная зависимость коэффициента диэлектрических потерь ϵ'' для пленок с 4 об.% TiO_2 и процедура определения энергии активации приведены на рисунке 14.

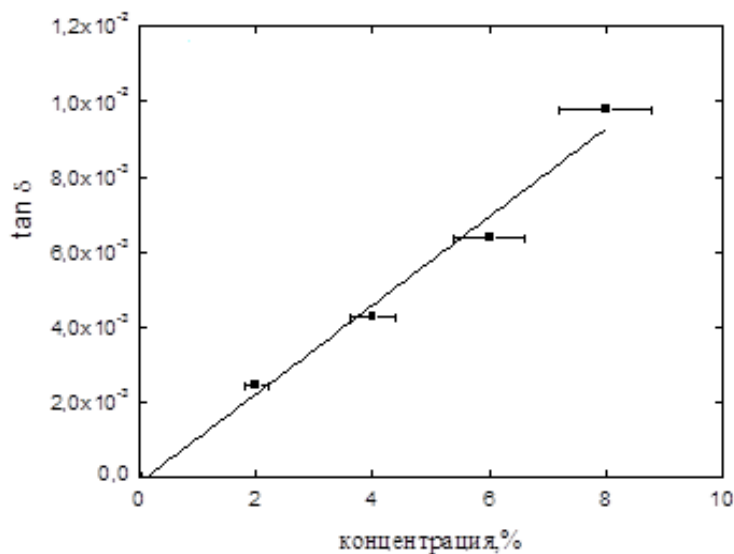


Рис. 13. Зависимость величины максимума высокотемпературного пика $\tan \delta$ от объемного содержания TiO_2 в пленках УПС

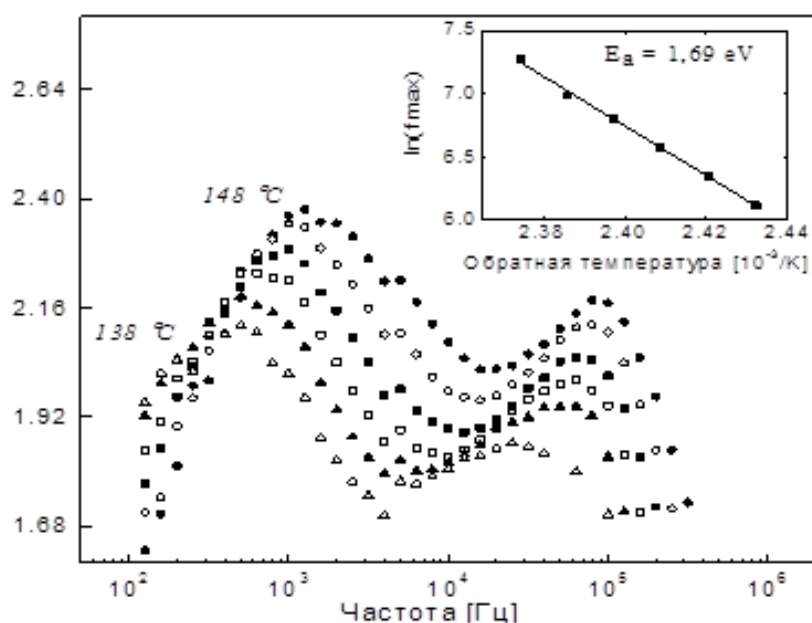


Рис. 14. Частотная зависимость коэффициента диэлектрических потерь для образцов УПС с 4 об.% TiO_2 при выбранных температурах (шаг 2 К). Вставка — процедура определения энергии активации для первого пика посредством линейризации зависимости логарифма частоты пика от обратной температуры

Рассчитанное значение энергии активации для первого пика на частотной зависимости диэлектрических потерь составляет 1.69 эВ, величина пика линейно зависит от концентрации наполнителя, его появление может быть связано с наличием наполнителя в образцах [4]. Второй релаксационный процесс (α -релаксация) связан с переходом полимера из стеклообразного в высокоэластическое состояние, что подтверждается также данными ДСК и ДМА. Полученные при помощи метода ДСК значения температуры стеклования для исследуемых образцов находятся в пределах $T \approx 97.1 \div 99.4^\circ C$, зависимости от концентрации наполнителя не наблюдается.

Температурная зависимость модуля упругости исходных и композитных пленок УПС, полученная при помощи динамического механического анализа, приведена на рисунке 15. При температуре выше $90^\circ C$ наблюдается резкий спад модуля упругости, что говорит о процессе перехода вещества из стеклообразного в высокоэластическое состояние.

Кроме того, увеличение содержания наполнителя в образце ведет к увеличению модуля упругости, то есть к улучшению механических свойств материала (при $T < T_c$).

Токи термостимулированной деполяризации

Спектр токов ТСД для исходных и композитных пленок УПС с добавлением 2 и 4 об.% TiO_2 для малых поляризующих напряжений ($E_n = 0.01$ МВ/м) представлен на рисунке 16.

На спектре токов ТСД для композитных пленок наблюдаются три релаксационных процесса. Наличие низкотемпературного пика ($T \approx 100^\circ C$) характерно для всех образцов, его положение соответствует температуре стеклования, известной для УПС [2; 6; 7]. Для исходных пленок УПС без наполнителя и композитных пленок характерно также наличие второго пика, связанного с проводимостью по ловушкам, этот процесс проявляется на

спектре токов ТСД вследствие неоднородности образца по толщине. Третий пик проявляется только для композитных образцов.

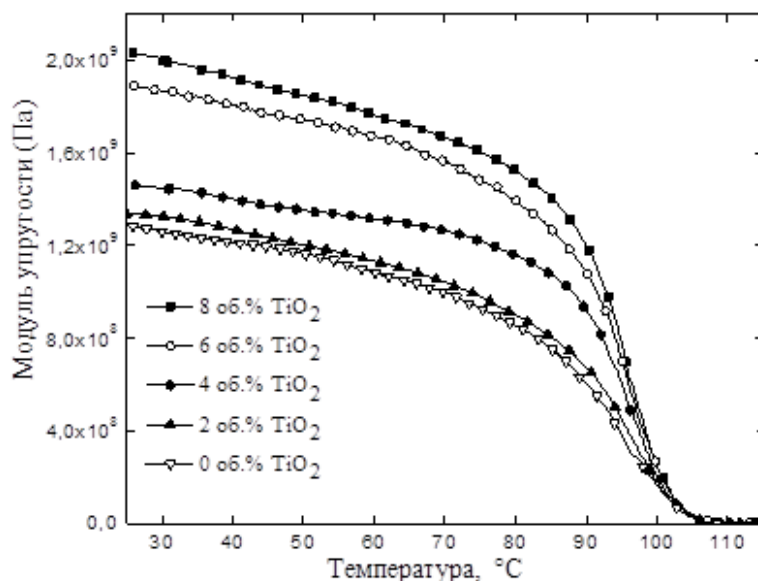


Рис. 15. Температурная зависимость модуля упругости для исходных и композитных пленок УПС, полученная на частоте 1 Гц при помощи метода ДМА

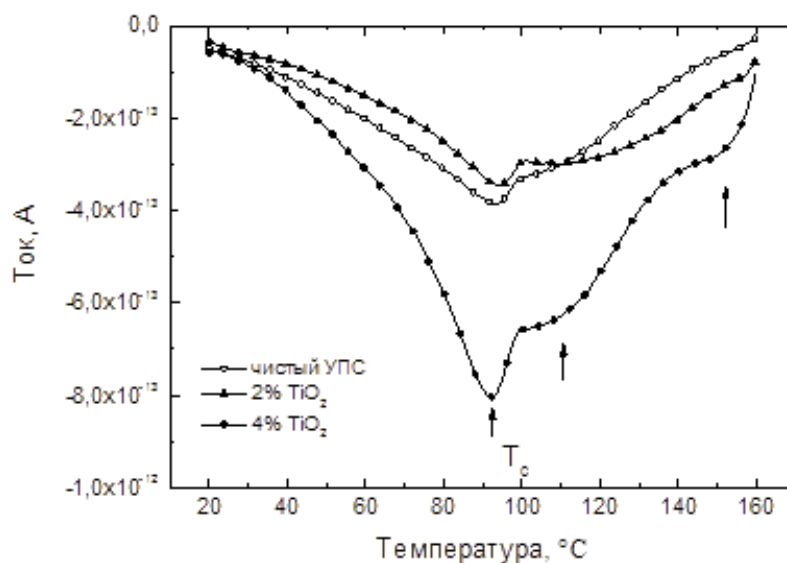


Рис. 16. Спектр токов ТСД для пленок чистого УПС и с различным процентным содержанием наполнителя ($E_{II} = 0.01$ МВ/м, $T_{II} = 100^\circ\text{C}$, $t_{II} = 10$ мин, скорость нагрева $\beta = 3$ К/мин)

При помощи метода частичной термоочистки был выделен второй пик на кривых тока ТСД для пленок УПС с добавлением 4 об.% TiO_2 , кривые были получены для двух скоростей нагрева (рис. 17 а, б).

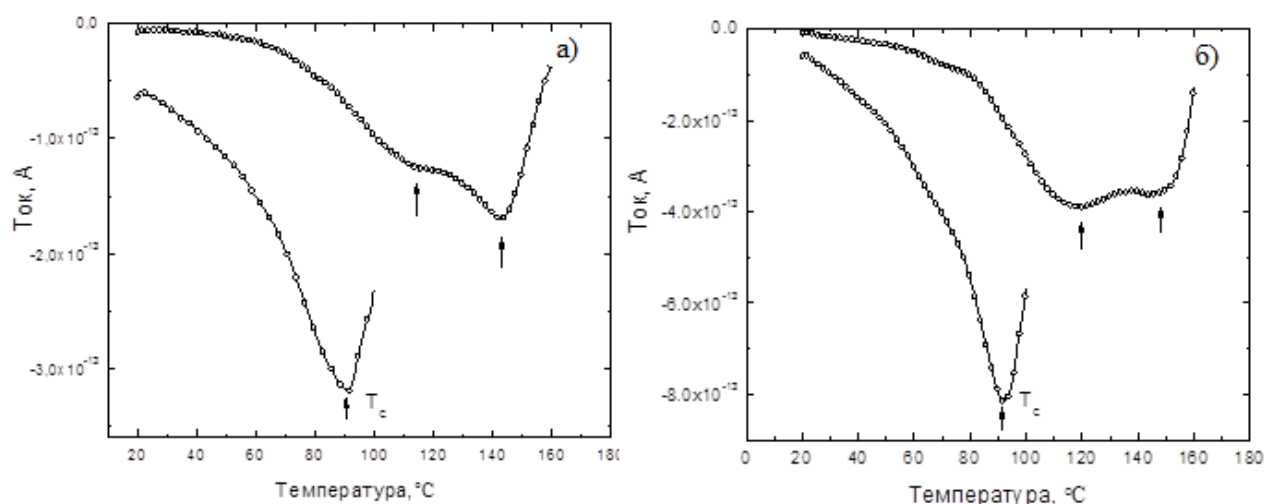


Рис. 17. Метод частичной термоочистки.
Кривые тока ТСД для пленок УПС с добавлением 4 об.% TiO_2 :
а — скорость нагрева $\beta = 3$ К/мин, б — скорость нагрева $\beta = 1$ К/мин

Спектр энергетического распределения, восстановленный по данным токов ТСД для двух скоростей нагрева, приведен на рисунке 18. Полученное значение энергии активации второго пика на кривых ТСД для пленок УПС с 4% наполнителя ($W = 1.05 \pm 0.05$ эВ, $\omega_s = 5 \times 10^{10} \text{ с}^{-1}$) хорошо согласуется со значением энергии активации, рассчитанным для этих образцов по данным ТСРПП ($W = 1.12 \pm 0.04$ эВ), что позволяет связать природу этого пика с проводимостью по центрам захвата носителей заряда.

Величина третьего пика, характерного для композитных пленок УПС, зависит от значения поляризующего напряжения. На рисунке 19 представлены спектры токов ТСД для исходных и композитных пленок УПС с добавлением 2 и 4 об.% TiO_2 ($E_n = 1$ МВ/м). На спектре токов ТСД вновь наблюдается низкотемпературный пик (α — релаксация), связанный с переходом вещества из стеклообразного состояния в высокоэластическое, который характерен для всех исследуемых образцов.

Второй релаксационный переход, связанный с проводимостью в образце, наблюдается в исходных пленках УПС при температуре примерно $T \approx 110^\circ\text{C}$. Для композитных пленок УПС при данном значении поляризующего напряжения, отличающегося от исходного в 100 раз, наблюдается широкий пик при температуре $T \approx 140^\circ\text{C}$, представляющий собой суперпозицию второго и третьего пиков. С увеличением значения поляризующего напряжения заметно повышение величины третьего пика, а между величиной максимума второго (высокотемпературного) пика и объемным содержанием наполнителя в образце (рис. 20) наблюдается практически линейная зависимость. Это позволяет предположить, что его появление связано с наличием полярных структур в образце, а именно с «макродиполями», к появлению которых ведет накопление заряда на границе раздела сред полимер — наполнитель вследствие разницы в значениях проводимости полимерной матрицы и наполнителя. Оценка энергии активации, рассчитанной для третьего пика методом варьирования скоростей нагрева, дает значение порядка $W = 1.7$ эВ, что согласуется с данными диэлектрической спектроскопии и позволяет связать появление этого пика с наличием «макродиполей», возникающих на частицах наполнителя.

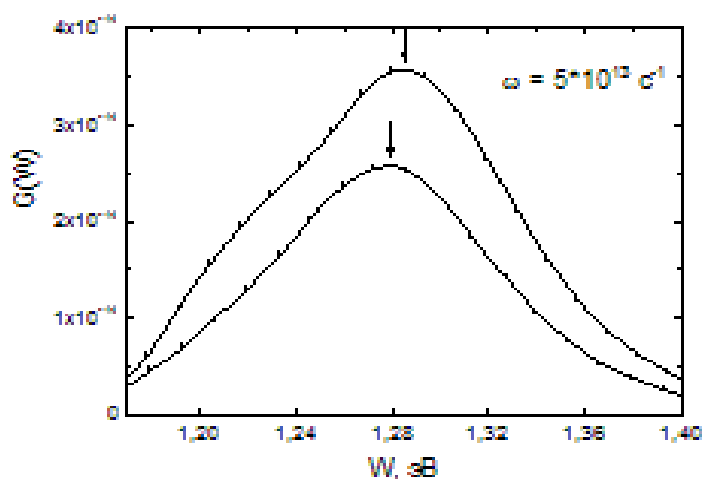
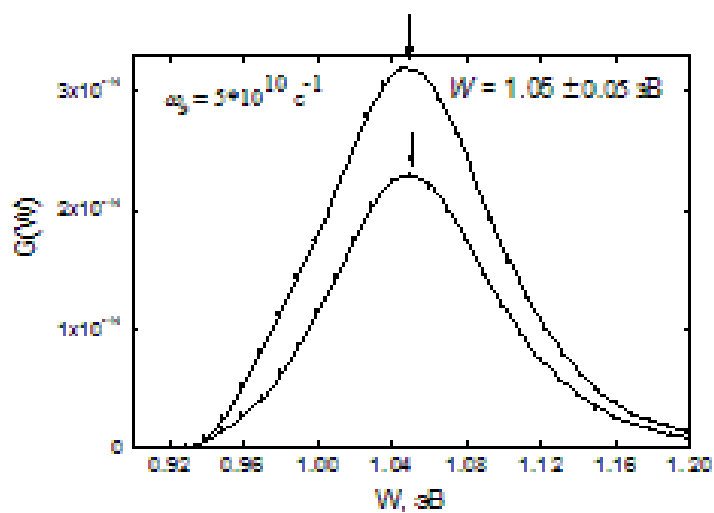
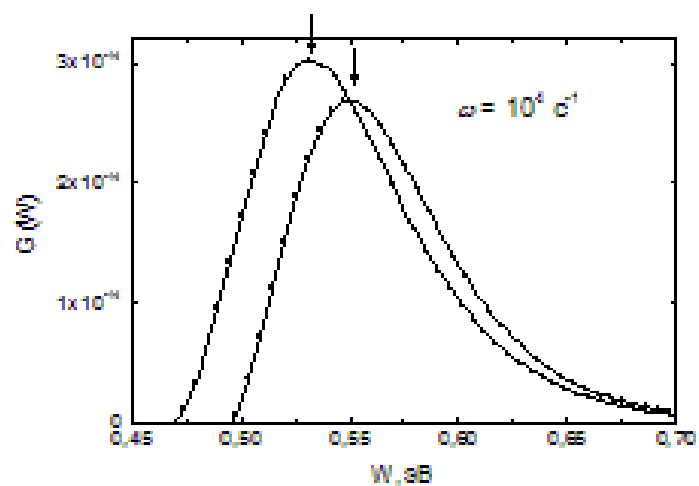


Рис. 18. Версии функции распределения, восстановленные при помощи метода регуляризации для второго пика тока ТСД для пленок УПС с добавлением 4 об.% TiO_2

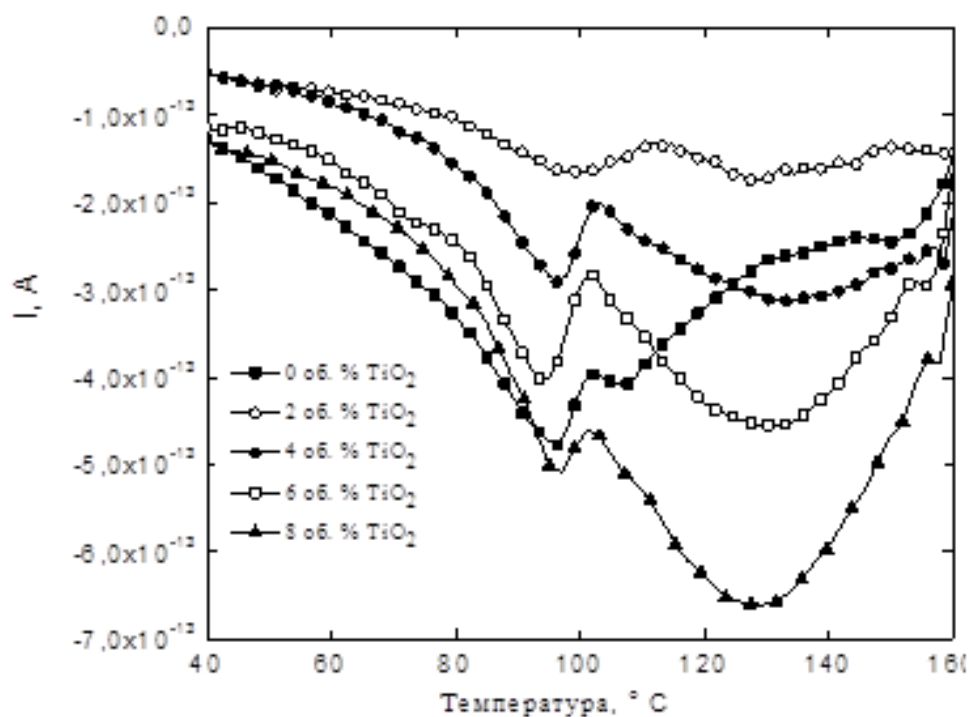


Рис. 19. Спектр токов ТСД для пленок чистого УПС и с добавлением 2 и 4 об.% диоксида титана ($E_{II} = 1 \text{ МВ/м}$, $T_{II} = 100^\circ\text{C}$, $t_{II} = 10 \text{ мин}$, скорость нагрева $\beta = 3 \text{ К/мин}$)

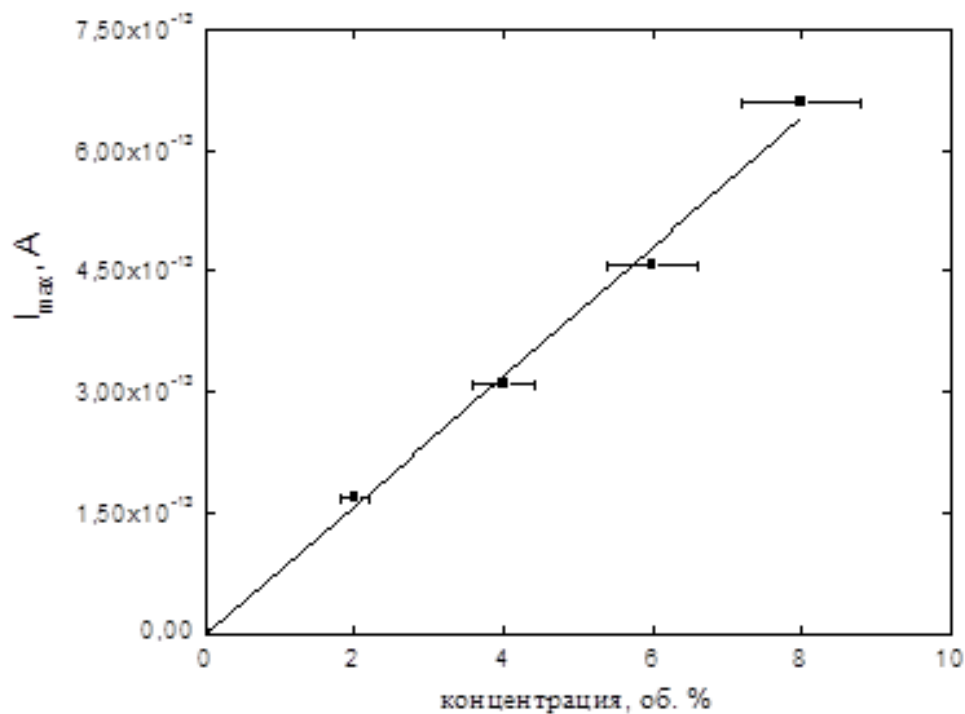


Рис. 20. Зависимость величины максимума высокотемпературного пика тока ТСД от процентного содержания наполнителя в пленках УПС

Заключение

Установлено, что в пленках УПС стабильность электретного состояния определяется проводимостью по глубоким ловушкам носителей заряда, глубина которых для образцов без наполнителя составляет значение $W = 0.87 \pm 0.03$ эВ, а для композитных пленок лежит в пределах от 1.1 до 1.18 эВ (в частности, для пленок с 4 об.% TiO_2 $W = 1.12 \pm 0.04$ эВ), что объясняет большую температурную и временную стабильность электретного состояния, характерную для композитов. Для всех исследуемых образцов наблюдается процесс перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние (что подтверждается данными диэлектрической спектроскопии, ДСК и ДМА), который не влияет на стабильность электретного состояния и не зависит от введения наполнителя. Наличие сквозной проводимости подтверждается результатами диэлектрической спектроскопии. Согласно данным диэлектрической спектроскопии, в композитных пленках на основе УПС присутствует также релаксационный процесс, связанный с наличием в образце полярных структур, так как величина соответствующих пиков диэлектрических потерь и токов ТСД оказывается пропорциональной концентрации наполнителя. Данные токов ТСД также подтверждают наличие в образцах сквозной проводимости, перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние и полярных структур, наблюдается корреляция полученных значений энергий активации релаксационных процессов. В качестве объяснения природы полярных структур может быть высказано предположение о наличии «макродиполей», роль которых могут играть частицы наполнителя (рутила). Наблюдаемый релаксационный механизм не оказывает влияния на стабильность электретного состояния в исследуемых образцах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гороховатский Ю. А., Бордовский Г. А.* Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков. М.: Наука, 1991. 248 с.
2. *Goyanes S. N.* Dynamic mechanical behavior of atactic and high-impact polystyrene // *Journal of applied polymer science*. 2000. Vol. 75. P. 865–873.
3. *Gulyakova A., Frübing P., and Gorokhovatskiy Yu. A.* Relaxation processes and electrets properties of titanium-dioxide filled high-impact polystyrene films // *Proceedings of 14th International Symposium on Electrets (27–31 August)*. Montpellier, France, 2011. P. 139–140.
4. *Gulyakova A., Frübing P., Gorokhovatskiy Yu.* Dielectric Relaxation in Titanium-Dioxide Filled High-Impact Polystyrene (HIPS) Films. *Conf. Proc. of XIII Int. conf. «Physics of Dielectrics»*, St. Petersburg, 2–6 June. Vol. 1. Pp. 263–266 (2014).
5. *Gulyakova A. A., Frübing P., Gorokhovatskiy Yu. A.* Mechanism Limiting the Electret-State Stability in Titanium-Dioxide Filled High-Impact Polystyrene Films. *Conf. Proc. of 15th International Symposium on Electrets*, August 10–13, Baltimore, MD, USA (2014).
6. *Menard K. P.* Dynamic mechanical analysis: A practical introduction. — Boca Raton; London; New York: CRC Press, 2008. 218 P.
7. *Sessler G. M.* Electrets, 3rd ed. Vol. 1. California: Laplacian Press, 1999, 99.94, 165.

REFERENCES

1. *Gorokhovatskiy Ju. A., Bordovskij G. A.* Termoaktivatsionnaja tokovaja spektroskopija vysokoomnyh poluprovodnikov i dijelektrikov. М.: Nauka, 1991. 248 s.
2. *Goyanes S. N.* Dynamic mechanical behavior of atactic and high-impact polystyrene // *Journal of applied polymer science*. 2000. Vol. 75. P. 865–873.
3. *Gulyakova A., Frübing P., and Gorokhovatskiy Yu. A.* Relaxation processes and electrets properties of titanium-dioxide filled high-impact polystyrene films // *Proceedings of 14th International Symposium on Electrets (27–31 August)*. Montpellier, France, 2011. P. 139–140.

4. Gulyakova A., Frübing P., Gorokhovatskiy Yu. Dielectric Relaxation in Titanium-Dioxide Filled High-Impact Polystyrene (HIPS) Films. Conf. Proc. of XIII Int. conf. «Physics of Dielectrics», St. Petersburg, 2–6 June. Vol. 1. Pp. 263–266 (2014).

5. Gulyakova A. A., Frübing P., Gorokhovatskiy Yu. A. Mechanism Limiting the Electret-State Stability in Titanium-Dioxide Filled High-Impact Polystyrene Films. Conf. Proc. of 15th International Symposium on Electrets, August 10–13, Baltimore, MD, USA (2014).

6. Menard K. P. Dynamic mechanical analysis: A practical introduction. — Boca Raton; London; New York: CRC Press, 2008. 218 P.

7. Sessler G. M. Electrets, 3rd ed. Vol. 1. California: Laplacian Press, 1999, 99.94, 165.

Д. А. Игнатьева, Е. А. Карулина, О. В. Чистякова

МЕХАНИЗМ РЕЛАКСАЦИИ ЭЛЕКТРЕТНОГО СОСТОЯНИЯ В ПЛЕНКАХ ПОЛИЛАКТИДА С ДИСПЕРСНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

(Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки
в рамках базовой части государственного задания)

Работа содержит результаты изучения механизмов возникновения электретного состояния в композитных пленках на основе полилактида с нанодисперсным наполнителем BaTiO₃ методами ИК-спектроскопии и термостимулированной релаксации потенциала (ТСРП). Было установлено, что введение наполнителя в композит изменяет механизм релаксации поверхностного потенциала и приводит к улучшению стабильности электретного состояния в исследуемых образцах.

Ключевые слова: полилактид, электретное состояние, заряд-дипольный комплекс, релаксация поверхностного потенциала, ИК-спектроскопия, биоразлагаемая активная упаковка.

D. Ignatyeva, E. Karulina, O. Chistiakova

THE MECHANISM OF ELECTRET STATE RELAXATION IN POLYLACTIDE FILMS CONTAINING DISPERSED FILLER

The results of the investigation of electret state mechanism in the composite films based on polylactide containing nanodispersed filler BaTiO₃ using IR-spectroscopy and thermally stimulated relaxation of the superficial potential are presented. The findings show that the introduction of the filler in the composite modifies the superficial potential relaxation mechanism and leads to an improved stability of the electret state in the test samples.

Keywords: polylactide, electret state, the charge-dipole complex, the thermally stimulated relaxation of the superficial potential, IR-spectroscopy, biodegradable active packaging.

Широкое использование полимерных материалов в качестве упаковки поднимает вопрос об уничтожении и захоронении полимерных материалов после истечения срока эксплуатации (биоразлагаемых материалов). С другой стороны, в последнее время интенсивно ведется разработка полимерных материалов, используемых в качестве «активной» упаковки, позволяющей сохранять органолептические свойства пищевой продукции [2–6].

В связи с этим **актуальным** является создание композитных полимерных материалов, обладающих свойствами активной упаковки и одновременно являющихся биоразлагаемыми материалами.