



**ПОЛИТЕХ**  
Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

*На правах рукописи*



**ДЖАЙАСИНГХЕ БЕНТАРА МАХАСАМИЛАГЕ ДОН НИЛАН САНКАЛПА**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В  
ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИИМИДНЫХ ПЛЕНКАХ**

2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель:	<b>Борисова Маргарита Эдуардовна,</b> доктор технических наук, профессор.
Официальные оппоненты:	<b>Андреев Александр Михайлович,</b> доктор технических наук, доцент, Акционерное общество «Силовые машины», завод «Электросила», главный специалист по электроизоляционным материалам, г. Санкт-Петербург  <b>Осина Юлия Константиновна,</b> кандидат технических наук, Акционерное общество «НИИЭФА им. Ефремова», научно-исследовательское отделение ионных ускорителей, НИЛ МСиДП в ЦУ, заместитель начальника отделения-начальник лаборатории, г. Санкт-Петербург
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Защита состоится 22 апреля 2026 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета У.2.4.1.39 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главный учебный корпус, аудитория 118).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://www.spbstu.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «    » марта 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета У.2.4.1.39  
кандидат технических наук, доцент

Миневич Татьяна Геннадьевна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Актуальность данной работы обусловлена широким использованием полимерных диэлектриков в электроизоляционной технике, в конденсаторостроении, в кабельной технике и производстве электретов. Область применения свойств полимерных диэлектриков постоянно расширяется. В последние годы возрос интерес к исследованию свойств модифицированных полимерных материалов и к изучению процессов накопления и релаксации заряда в них. Модификация известных полимеров и создание композиционных структур путем введения наполнителей является основным способом создания новых материалов. Преимуществом этих материалов является возможность управления их свойствами. Неравновесные процессы проводимости и поляризации тесно связаны с накоплением и релаксацией зарядов. Накопление объемного заряда представляет собой нежелательное явление, поскольку оно искажает электрическое поле, ухудшает электрическую прочность и сокращает ресурс работы изоляции. Проведение всесторонних исследований в этом направлении целесообразно в связи с расширяющимся применением этих плёнок в качестве электрической изоляции в экстремальных условиях при воздействии не только электрического поля, но и механических усилий, температуры и влажности окружающей среды.

В современной промышленности и технике полимерные плёнки используются не только как изоляционные, но и как активные диэлектрики (электреты). Электретами называются диэлектрики, в которых посредством специальной обработки создано распределение зарядов, обеспечивающее длительное существование электрического момента. Электреты применяются в различных электромеханических преобразователях. Роль электромеханических преобразователей возрастет в связи с микроминиатюризацией радиоаппаратуры. В последнее время электреты из модифицированных пленок нашли применение в медицине и биотехнологиях. Накопление объемного заряда в значительной степени определяет процессы поляризации и нестационарного электропереноса в диэлектрике.

### **Степень разработанности научной проблемы**

Процессы электропереноса и накопления заряда определяют основные электрические и электретные свойства полимерных диэлектриков. Ранее Сесслером Г., Гороховатским Ю.А., Темновым Д.Э., Раджу Г.Г., Борисовой М.Э. и Койковым С.Н. изучались механизмы электропереноса, накопления и релаксации заряда. При изучении использовался целый ряд известных методов: метод компенсации электретного потенциала, метод токов термостимулированной деполяризации (ТСД). Анализ абсорбционных характеристик проводился на основе различных эквивалентных схем и физических моделей. Однако, комплекс данных методик не применялся к современным термопластичным полиимидам, что и было одной из целей настоящей работы.

**Цель работы.** Изучение нестационарных релаксационных процессов в термопластичных аморфных полиимидных пленках Р-ОДФО и Р-СОД связанных с накоплением и релаксацией заряда.

Для решения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- изучить совокупность абсорбционных характеристик: тока зарядки  $I_{зар}(t)$ , тока разрядки  $I_{раз}(t)$ , напряжения саморазряда  $U_c(t)$ , восстановленного напряжения  $U_b(t)$  и коэффициентов абсорбции  $k_a$ .

- изучить температурную зависимость проводимости в постоянном электрическом поле термопластичных пленок Р-СОД и Р-ОДФО в изотермическом и термостимулированном режимах ниже температура стеклования.

- проанализировать экспериментальные данные на основе физических моделей и обобщенных схем Максвелла-Фойгта.

- рассчитать частотные зависимости диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  и фактора потерь в области низких частот ( $10^{-4}$ - $10^{-1}$  Гц) в широком интервале температур.

- изучить электретные свойства термопластичных полимерных пленок в изотермическом и термостимулированном режимах: электретную разность потенциалов  $U_c(t, T)$ , спектры термостимулированных токов  $I_{гсд}(t, T)$ .

### **Научная новизна**

Научная новизна заключается в изучении электрофизических и электретных свойств новых отечественных термопластичных полиимидных пленок Р-ОДФО и Р-СОД.

Впервые изучена совокупность абсорбционных, электрических характеристик и электретных свойств пленок Р-СОД и Р-ОДФО, полученных методом полива раствора на стекло. Экспериментально изучены и теоретически проанализированы зависимости  $I_{зар}(t)$ ,  $I_{раз}(t)$ ,  $U_c(t)$  и  $U_b(t)$  и  $k_a(T)$  в широком временном и температурном интервале. Уточнены механизмы релаксационных процессов в ТП ПИ пленках в широком интервале температур на основе современных физических моделей. Определены параметры релаксаторов, управляющих накоплением и транспортом зарядов. Оценены пределы применимости физических моделей путем сопоставления экспериментально полученных результатов с рассчитанными зависимостями. Получена температурная зависимость собственной проводимости исследуемых пленок.

Показано, что при подаче постоянного напряжения в пленках Р-ОДФО и Р-СОД, спадание тока с течением времени обусловлено поляризацией Максвелла Вагнера.

Из анализа зависимостей токов зарядки и разрядки получены параметры эквивалентных схем Фойгта и Максвелла. На основе экспериментальных данных рассчитаны диэлектрические характеристики  $\epsilon'(\omega)$  и  $\epsilon''(\omega)$ .

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

В образцах ТП ПИ Р-ОДФО и Р-СОД с учетом полученных эксперимен-

тальных данных выявлены механизмы накопления и релаксации заряда. На основе параметров эквивалентных схем рассчитаны низкочастотные характеристики диэлектрической проницаемости и потерь.

В рамках диссертационной работы разработан и изготовлен измерительный блок Абсорбция-3/23, который автоматически регистрирует весь абсорбционный процесс в режиме саморазряда и в режиме восстановленного напряжения с целью определения  $\kappa_a$  и диагностики состояния материала в различных конструкциях.

Экспериментально показано, что при приложении постоянного электрического поля с напряженностью  $E=10^5$  В/м и в коронном разряде в пленках Р-СОД и Р-ОДФО накапливается гомозаряд.

### **Методология и методы исследования**

Исследованы процессы накопления и релаксации заряда в новых ТП ПИ пленках с помощью различных методов: измерение токов зарядки и разрядки; метод компенсации; метод термоактивиционной спектроскопии (токи ТСД).

Разработана автоматизированная установка для регистрации напряжения саморазряда и восстановленного напряжения образцов диэлектриков и конденсаторов в процессе измерения абсорбционных характеристик по системе, описанной в ГОСТ28885-Р.

Изучены абсорбционные характеристики в новых пленочных ТП ПИ материалах. На основе схемы Фойгта проанализированы токи, измеренные при помощи пикоамперметра МНИПИ А-2, в процессе зарядки и разрядки.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Получена зависимость  $\lg \gamma = f\left(\frac{5040}{T}\right)$  в области температур ниже  $T_c$ . Установлено, что эти зависимости идентичны и имеют криволинейной характер. Величины удельной проводимости  $\gamma$  пленок Р-СОД в области температур близких к  $T_c$  на порядок выше, чем у пленок Р-ОДФО.
2. Экспериментально установлено, что при приложении постоянного электрического поля с напряженностью  $E=10^5$  В/м и в коронном разряде в пленках Р-СОД и Р-ОДФО накапливается гомозаряд.
3. Установлено, что в пленках Р-ОДФО и Р-СОД спадание тока с течением времени обусловлено поляризацией Максвелла Вагнера.
4. Экспериментально измеренные зависимости  $I_{зар}(t)$  проанализированы на основе обобщенной абсорбционной теории Фойгта и Максвелла и определены параметры эквивалентных схем.
5. Показано, что зависимости  $\kappa_a(T)$ , определённые методом восстановленного напряжения, пленок Р-ОДФО и Р-СОД описываются кривыми с максимумом, а  $\kappa_{a пр}(T)$  линейно возрастает с увеличением температуры.

### **Степень достоверности полученных результатов**

Достоверность обеспечивается использованием современной аппаратуры (МНИПИ А-2), большим объемом экспериментальных данных и их статистической обработкой, использованием современных программных пакетов Origin

2019, Arduino IDE. Теоретические результаты получены с применением известных методов математической физики и теории дифференциальных уравнений.

### **Апробация результатов работы**

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- 59-й Международной научной конференции по энергетике и электротехнике Рижского технического университета - RTUCON2018 (Рига, 2018);
- 14-й Санкт-Петербургской международной конференции молодых ученых “СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУК О ПОЛИМЕРАХ”, (Санкт-Петербург, 2018);
- Международной конференции молодых российских исследователей в области электротехники и электроники Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering ElConRus 2021 (Санкт-Петербург, 2021);
- Международной конференции молодых российских исследователей в области электротехники и электроники Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering ElConRus 2022 (Санкт-Петербург, 2022);
- 16-й Санкт-Петербургской международной конференции молодых ученых “СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУК О ПОЛИМЕРАХ”, (Санкт-Петербург, 2022);
- Конгрессе II молодых ученых в России (Сочи, 2022);
- XIX Международной Научно-Практической конференции «Новые Полимерные Композиционные Материалы» (Эльбрус, 2023);
- 17-й Санкт-Петербургской международной конференции молодых ученых “СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУК О ПОЛИМЕРАХ”, (Санкт-Петербург, 2023)

### **Личный вклад автора**

Экспериментальные данные были получены лично автором в лабораториях СПбПУ. Объектом изучения являлись термопластичные пленки ПИ Р-СОД и Р-ОДФО, изготовленные в лаборатории Филиала НИЦ "Курчатовский институт" - ПИЯФ - ИВС. Теоретический анализ экспериментальных данных и разработка физических моделей проводились совместно с научным руководителем д.т.н. профессором Борисовой М.Э. Разработка схемы, изготовление макета, электрический монтаж и изготовление новой установки “Абсорбция 3/23” были выполнены автором самостоятельно. В процессе изготовления установки автором разработан алгоритм и программы на языке “С”. Автор благодарит научного руководителя Борисову М.Э. и доцента П.Н. Бондаренко за его советы и участие при создании установки "Абсорбция 3/23".

### **Публикации**

Основные научные результаты диссертации опубликованы в **15** печатных

работах, из которых 2 – в рецензируемых изданиях, определяемых в соответствии с рекомендацией ВАК и 5 индексируемых в международных базах данных Scopus, Web of Science и 1 – Государственная регистрация программы для ЭВМ на изобретение.

### **Объем и структура диссертации**

Работа состоит из введения, четыре главы, заключения, списка литературы, содержащего 103 наименования и приложений А и Б. Диссертация изложена на 117 страницах, содержит 59 рисунков и 12 таблицы.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность предмета исследования, глубина анализа научной проблемы, устанавливаются цель и задачи исследования, подчеркивается оригинальность исследования и излагается теоретическая и практическая значимость работы. Излагаются основные положения, представленные на рассмотрение. Обосновывается надежность полученных результатов.

**В первой главе** проведен всесторонний обзор научной литературы по теме диссертации, в котором представлены данные основных электрических и физико-химических свойств полимеров. Обзор литературы указывает на постоянный интерес к изучению свойств новых термопластичных полиимидов. Абсорбционные характеристики и электретные свойства термопластичных полиимидов Р-ОДФО и Р-СОД до последнего времени не изучались. Следовательно, из обзора литературы следует необходимость изучения этих свойств.

**Во второй главе** описаны методики экспериментального изучения релаксационных процессов в термопластичных полиимидах. Объектами исследования были термопластичные полиимидные пленки Р-ОДФО (R-BAPB) и Р-СОД (R-BAPS), которые являются аналогами импортных полимеров РЕЕК, ULTEM, LaRC-TPI. Структурные формулы этих материалов приведены на рисунках 2.1 - 2.2.

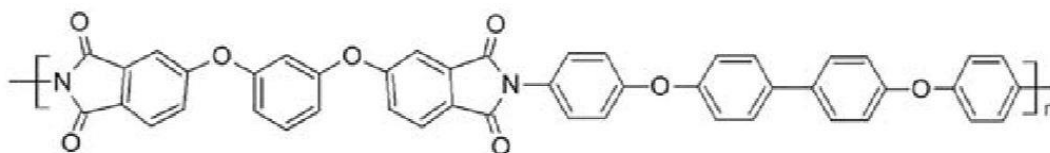


Рисунок 1 – Химическая формула ТП ПИ Р-ОДФО

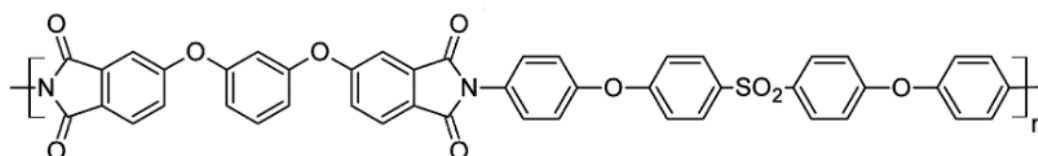


Рисунок 2 – Химическая формула ТП ПИ Р-СОД

Вторая глава посвящена описанию методов изучения различных абсорбционных характеристик термопластичных полиимидных пленок Р-ОДФО и Р-СОД.

Токи зарядки и разрядки измерялись в изотермических условиях в диапазоне температур от 25°C до 200°C с помощью пикоамперметра МНИПИ-А2. В главе рассматриваются условия единичности эквивалентных схем Максвелла и Фойгта, которые дают возможность расчета напряжения саморазряда и восстановленного напряжения. Приведены методы расчета частотных характеристик: диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  ( $\omega$ ) и фактора потерь  $\epsilon''(\omega)$  в области низких частот (до  $10^4$  Гц) в синусоидальных электрических полях.

Систематическое изучение процессов накопления и релаксации заряда полиимидных пленок в коронном разряде и в постоянном электрическом поле  $E=10^5$  В/м вносит весомый вклад в обширное понимание механизмов зарядки.

При выполнении работы использовался комплекс различных методов: термоактивоцонной спектроскопии, измерения компенсирующей разности потенциалов, измерения напряжения самозаряда и восстановленного напряжения.

**Третья глава** посвящена изучению абсорбционных характеристик термопластичных полиимидов. Основное внимание уделяется изучению зависимостей токов зарядки и разрядки термопластичных пленок Р-СОД и Р-ОДФО в интервале температур 25°C - 200°C (ниже  $T_c$ ). Измерения проводились в течение длительного времени до установления постоянного сквозного тока при напряженности электрического поля  $E=10^5$  В/м. Результаты измерений  $I_{зар}(t)$  и  $I_{раз}(t)$  приведены на рисунках 3,4.

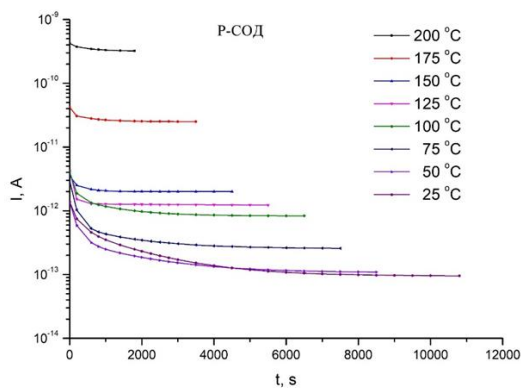


Рисунок 3. Зависимости токов  $I_{зар}(t)$  пленок Р-СОД

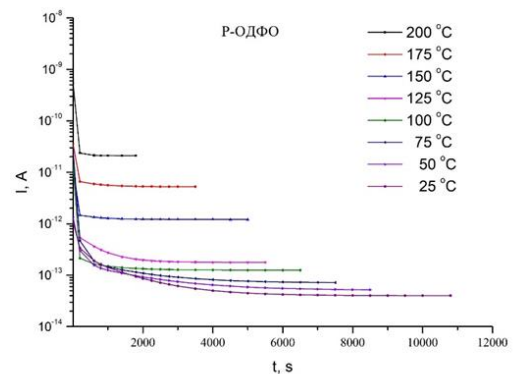


Рисунок 4. Зависимости токов  $I_{зар}(t)$  пленок Р-ОДФО

По стационарным значениям токов, измеренных при разных температурах, рассчитывались температурные зависимости собственной проводимости плёнок. Зависимости  $\lg(\gamma)=5040/T$  приведены на рисунке 4. Полученные зависимости  $\lg(\gamma)=f(5040/T)$  пленок термопластичных Р-ОДФО и Р-СОД подобны во всём температурном интервале, а значения  $\gamma(T)$  близки. Следовательно, наличие в структурной формуле Р-СОД группы –  $SO_2$  практически не влияет на величину проводимости  $\gamma$ . При температуре 100 °C, которая существенно ниже температуры стеклования ( $T_c = 215^\circ C$ ) значения  $\lg(\gamma(T))$  резко возрастают, что не характерно для полимерных диэлектриков в области температур ниже  $T_c$ . Для

количественной оценки  $\gamma$  кривые  $\lg(\gamma) = f\left(\frac{1}{T}\right)$  аппроксимировались двумя прямолинейными

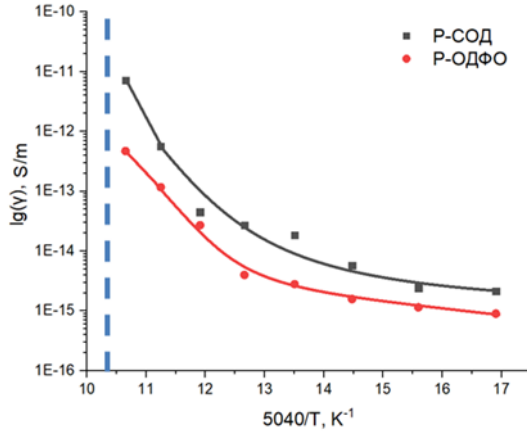


Рисунок 5. Температурные зависимости проводимости пленок ПИ P-ОДФО и P-СОД

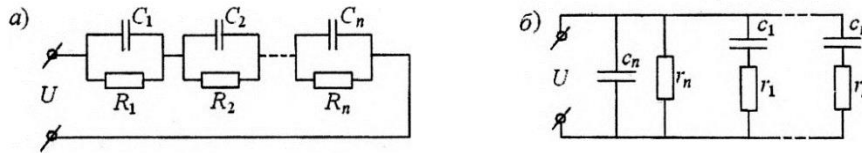


Рисунок 6. Эквивалентные схемы Максвелла (а) и Фойгта (б)

Согласно теории абсорбционных явлений, схема Фойгта идентична схеме Максвелла при условиях: равное количество n-пар элементов  $R_i, C_i$  (схема Максвелла) и  $r_i, c_i$  (схема Фойгта); совпадения соответствующих постоянных времени  $\tau_i, \vartheta_i$  и равенства суммарных значений сопротивлений и емкостей:

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n R_i = r_n; \quad C_{\Sigma} = \left[ \sum_{i=1}^n C_i^{-1} \right]^{-1} = c_n; \quad \tau_{\Sigma} = R_{\Sigma} C_{\Sigma} = \vartheta_n; \quad (1)$$

При определенных соотношениях между параметрами схемы Фойгта и Максвелла, выражения для всей совокупности абсорбционных характеристик имеют вид:

$$I_{\text{зар}}^{\Phi}(t) - I_{\text{СКВ}}^{\Phi} = I_{\text{СКВ}}^{\Phi} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{r_n}{r_i} \exp\left(-\frac{t}{\vartheta_i}\right), \quad I_{\text{СКВ}}^{\Phi} = \frac{U_p}{r_n}; \quad (2)$$

$$I_{\text{зар}}^{\text{M}}(t) - I_{\text{СКВ}}^{\text{M}} = -I_{\text{раз}}^{\text{M}}(t) = I_{\text{СКВ}}^{\text{M}} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\prod_{k=1}^n (\vartheta_i - \tau_k)}{\vartheta_i^2 \prod_{k \neq i} (\vartheta_i - \vartheta_k)} \exp\left(-\frac{t}{\vartheta_i}\right), \quad I_{\text{СКВ}}^{\text{M}} = \frac{U_p}{R_{\Sigma}};$$

$$I_{\text{раз}}^{\Phi}(t) = -I_{\text{СКВ}}^{\Phi} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{r_n}{r_i} \exp\left(-\frac{t}{\vartheta_i}\right);$$

$$I_{\text{раз}}^{\text{M}} = I_{\text{СКВ}}^{\text{M}} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\prod_{k=1}^n (\vartheta_i - \tau_k)}{\vartheta_i^2 \prod_{k \neq i} (\vartheta_i - \vartheta_k)} \exp\left(-\frac{t}{\vartheta_i}\right) \quad (3)$$

участками, по наклону которых рассчитывались значения энергии активации  $W$ . Изменение величины  $W$  определяет температурную зависимость интенсивности переходов и позволяет рассчитывать поведение полимерных молекул.

Было установлено что спадающие кривые  $I_{\text{зар}}(t)$  и  $I_{\text{раз}}(t)$  пленок P-ОДФО и P-СОД подобны.

Полный анализ всей совокупности абсорбционных характеристик  $I_{\text{зар}}(t)$ ,  $I_{\text{раз}}(t)$ ,  $U_c$ ,  $U_{\text{вос}}$  пленок выполнен на основе физических моделей и эквивалентных схем Фойгта и Максвелла.

$$U_c^\Phi(t) = U_p \sum_{i=1}^n \frac{\prod_{k=1}^n (\tau_i - \vartheta_k)}{\prod_{k \neq i} (\tau_i - \tau_k)} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right); \quad (4)$$

$$U_c^M(t) = U_p \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{R_\Sigma} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) = U_p \sum_{i=1}^n \frac{U_i^c(0)}{U_p} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right),$$

$$U_B^\Phi(t) = U_p \sum_{i=1}^n \frac{\prod_{k=1}^n (\tau_i - \vartheta_k)}{\tau_i \prod_{k \neq i} (\tau_i - \tau_k)} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right), \quad (5)$$

$$U_B^M(t) = U_p \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{R_\Sigma} \left(1 - \frac{\tau_\Sigma}{\tau_i}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right);$$

Анализ  $I_{\text{зар}}(t)$  проводился путем разложения на сумму экспонент с помощью авторской программы на языке python и графо-аналитическом методом. Установлено, что зависимости  $I_{\text{зар}}(t)$  описываются тремя экспонентами, то есть  $n-1=2$ . Определенные таким образом значения времен релаксации  $\vartheta_i$  и предэкспоненциальных множителей  $I_i$  использовались для расчетов параметров эквивалентной схемы Фойгта.

С учетом длительного измерения токов зарядки (4 часа) по параметрам схемы Фойгта рассчитывались характеристики  $\epsilon'(\omega)$  и  $\epsilon''(\omega)$  на частотах  $10^{-1}$ - $10^{-4}$  Гц. Зависимости  $\epsilon'(\omega)$  и  $\epsilon''(\omega)$ , вычисленные с помощью символического метода, приведены на рисунках.

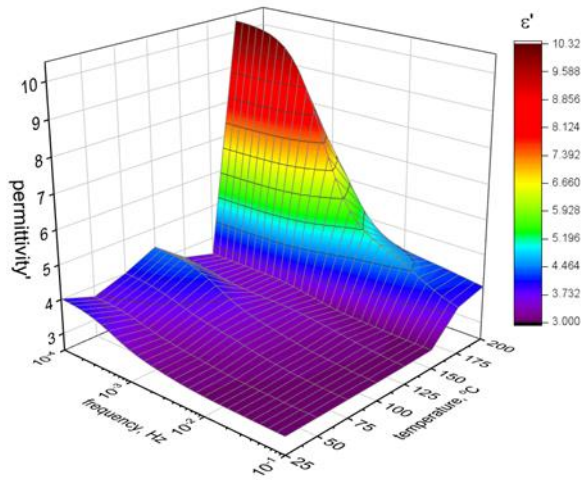


Рисунок 7. Зависимости  $\epsilon'=f(\omega)$  пленок Р-ОДФО при разных температурах

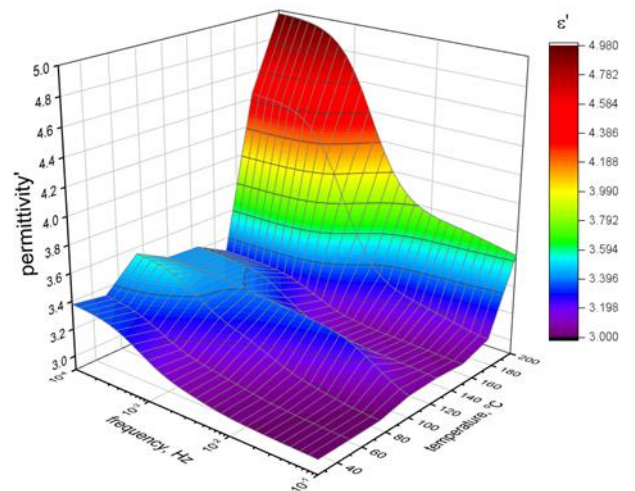


Рисунок 8. Зависимости  $\epsilon'=f(\omega)$  пленок Р-СОД при разных температурах

Из рисунков видно, что зависимости  $\epsilon'(\omega)$  в низкочастотной области электрического поля пленок Р-ОДФО и Р-СОД описываются спадающими кривыми, значения  $\epsilon'(\omega)$  увеличиваются с повышением температуры. Дисперсионная кривая  $\epsilon'(\omega)$  с повышением температуры смещается в область более высоких частот,

что указывает на наличие релаксационной поляризации. Контрольные опыты показали, что при  $E = 10^5$  В/м в термопластичных полиимидах накапливается гомо-заряд. С учетом ранее полученных данных установлено, что накопление гомо-заряда обусловлено поляризациями Максвелла Вагнера.

Установлено, что фактор потерь  $\varepsilon''(\omega)$  в низкочастотном диапазоне ( $10^{-1}$ - $10^{-4}$  Гц) описывается спадающими кривыми. Большие значения проводимости маскируют релаксационные максимумы. Полученные данные для ТП пленок Р-ОДФО и Р-СОД вносят значительный вклад в развитие физики полимеров.

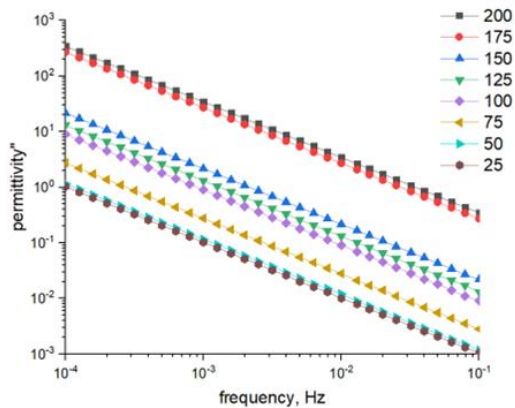


Рисунок 9. Зависимости  $\lg \varepsilon'' = \lg f(\omega)$  пленок Р-ОДФО при разных температурах

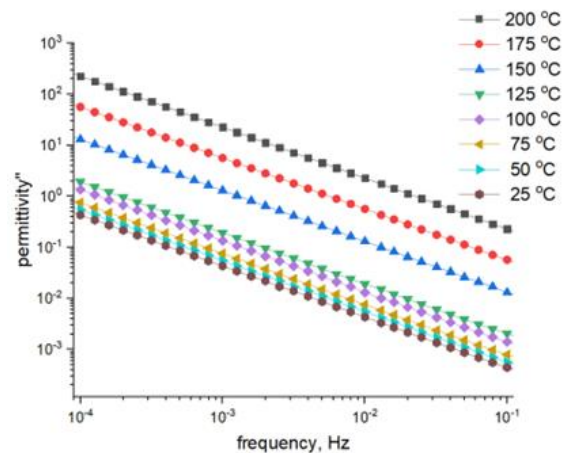


Рисунок 10. Зависимости  $\lg \varepsilon'' = \lg f(\omega)$  пленок Р-СОД при разных температурах

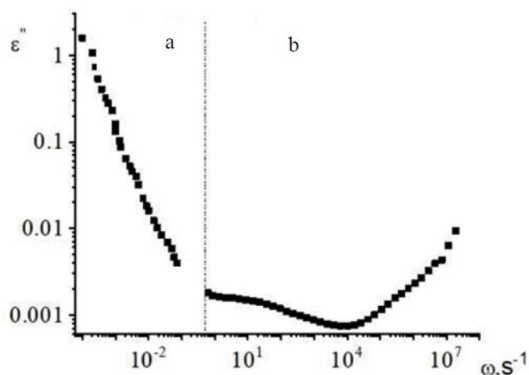


Рисунок 11. Частотные зависимости  $\varepsilon''(\omega)$ , рассчитанная по кривым  $I(t)$  (а), и экспериментальная измеренная  $\varepsilon''(\omega)$  (б)

Рассчитанные зависимости  $\lg(\varepsilon'')$  от  $\lg(\omega)$  пленок Р-ОДФО и Р-СОД в области низких частот имеют прямолинейный характер и практически не отличаются для исследуемых пленок. Установлено, что рассчитанный фактор потерь  $\varepsilon''(\omega)$  в диапазоне низких частот описывается спадающей кривой, что обусловлено влиянием собственной проводимости.

Из рисунка 11 видно, что зависимость  $\varepsilon''(\omega)$ , рассчитанная по параметрам схемы Фойгта и измеренная при частотах  $10^{-1}$ - $10^6$  Гц на приборе ALPHA-ANB хорошо согласуются при частоте при  $\omega \sim 1$  Гц. Это соответствие подтверждает правильность выполненных расчетов.

Для расчета восстановленного напряжения и напряжения саморазряда был сделан переход от эквивалентной схемы Фойгта к идентичной схеме Максвелла. С помощью параметров эквивалентной схемы Максвелла и выражений (4,5) были рассчитаны зависимости  $U_c = f(t)$  и  $U_v = f(t)$ . Как видно из рисунка 12(б) с увеличением температуры значения максимального восстановленного напряжения

возрастают при  $T \leq 125 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Расчитанные зависимости и  $U_c(t)$  и  $U_{вос}(t)$  приведены на рисунок.

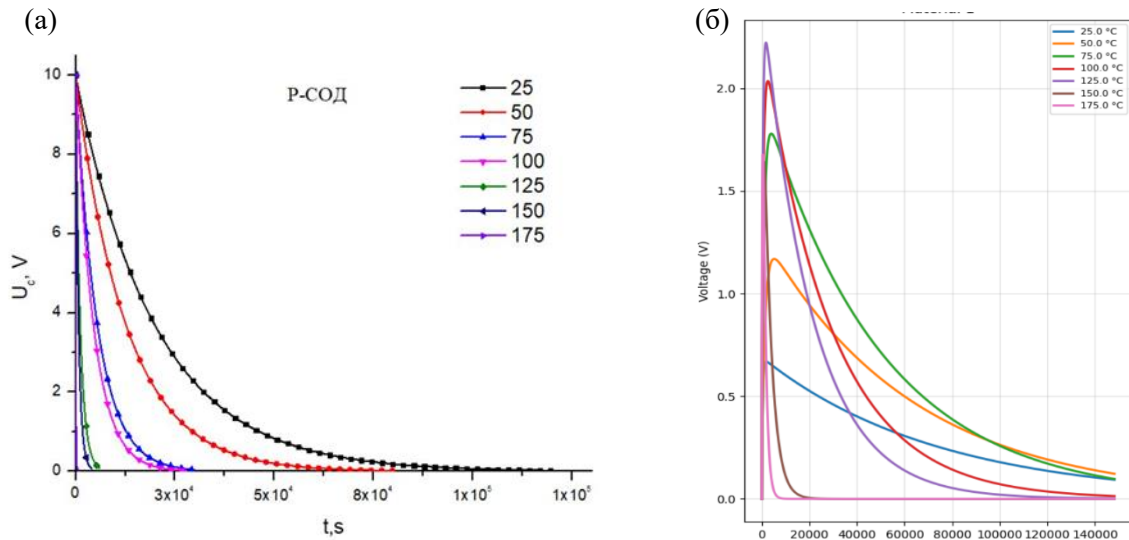


Рисунок 12. Зависимости  $U_c=f(t)$  и  $U_{вос}=f(t)$  пленок Р-СОД при разных температурах

При  $T \geq 150 \text{ }^\circ\text{C}$  резкое возрастание проводимости способствует уменьшению времени релаксации абсорбционного заряда в конденсаторе, в силу чего величина  $U_B$  уменьшается.

При выборе изоляционных конструкций практически важной величиной является коэффициент абсорбции. При расчете величины  $\kappa_a$  были использованы 3 разных метода. Расчитанные зависимости  $\kappa_a(T)$  приведены на рисунке 13.

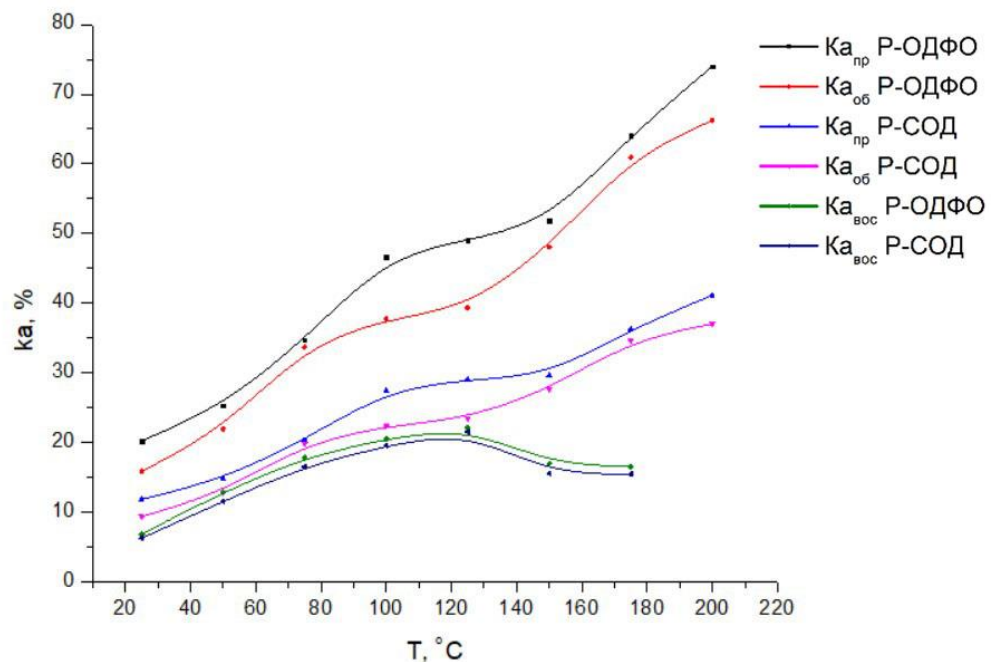


Рисунок 13 - Расчетные зависимости  $\kappa_a = f(T)$

Видно, что величины  $k_{a\text{ пр}}$ , рассчитанные по отношению емкостей и  $k_{a\text{ аб}}$ , рассчитанные по отношению абсорбционного заряда к поляризующему напряжению, увеличиваются линейно с ростом температуры. Зависимости  $k_{a\text{ вос}}(T)$ , определённые методом восстановленного напряжения пленок Р-ОДФО и Р-СОД описываются кривыми с максимумом.

**Четвёртая глава** посвящена изучению процессов накопления и релаксации заряда в пленках Р-ОДФО и Р-СОД, заряженных в коронном разряде. В образцах накапливался гомозаряд при значении  $U_e = 500\text{ В}$  ( $E = 10^7\text{ В/м}$ ). Процессы накопления и релаксации заряда изучались в изотермическом режиме  $U_e(t)$  и методом токов ТСД.

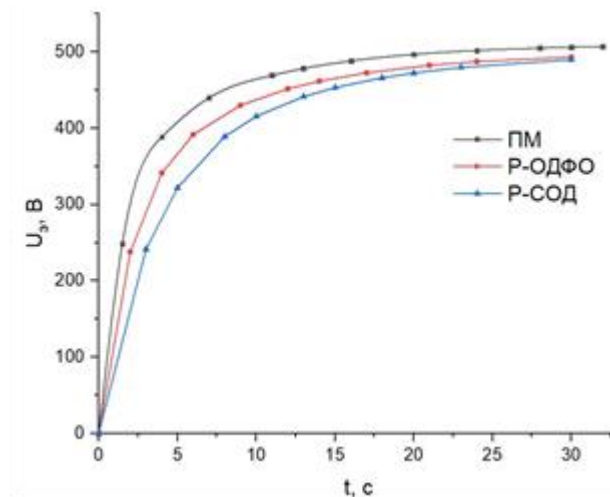


Рисунок 14 - Кинетика накопления заряда в пленках ПМ ПИ Р-ОДФО и Р-СОД

Как видно из рисунка 14, величина электретной разности потенциалов экспоненциально возрастает с течением времени. Для всех исследуемых образцов зависимости  $U_e(t)$  идентичны. Зарядка полимерных пленок ионами, проникающими в материалы из области коронного разряда, может быть описана с учетом двухслойной структуры. Один слой — полимерная пленка, другой — воздушный зазор над поверхностью пленки.

С целью изучения стабильности электретного состояния пленок полиимида измерялись зависимости  $U_e$  от времени образцов: ПМ, Р-ОДФО и Р-СОД при  $25^\circ\text{C}$  и  $100^\circ\text{C}$ , приведены на рисунках 15 и 16.

Из рисунка 14 видно, что стабильность электретного состояния термопластичного полиимида существенно ниже по сравнению с ПМ. Следовательно, термопластичные пленки не могут быть рекомендованы для использования в качестве электретных мембран.

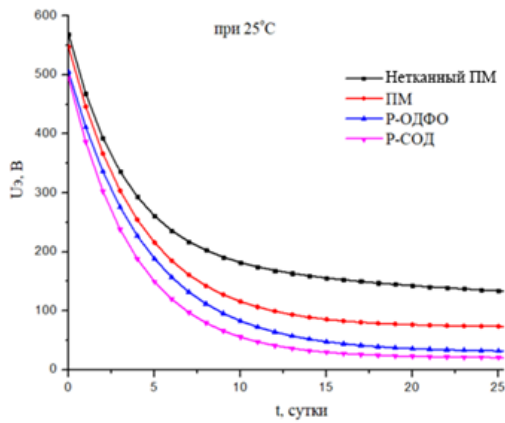


Рисунок 15 - Зависимости  $U_e$  от времени для образцов: нетканый ПМ, ПМ, Р-ОДФО и Р-СОД при 25°C

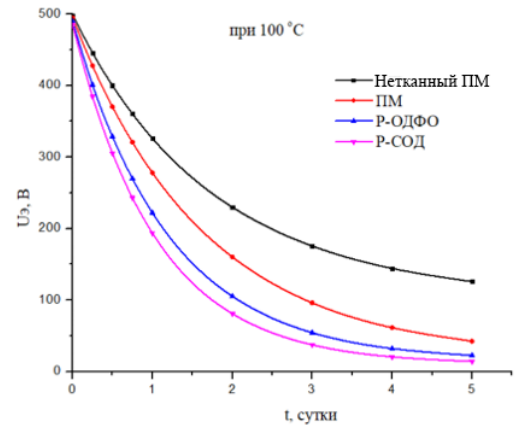


Рисунок 16 - Зависимости  $U_e$  от времени для образцов: нетканый ПМ, ПМ, Р-ОДФО и Р-СОД при 100°C

Для оценки стабильности электретоного состояния и определения механизма релаксации гомозаряда использовался метод термоактивационной спектроскопии (ТСД). Измерение токов ТСД пленок Р-СОД и Р-ОДФО проводилось в открытой цепи с использованием изолирующих пленок из ПТФЭ. Спектры токов ТСД пленок Р-СОД и Р-ОДФО приведены на рисунке 17.

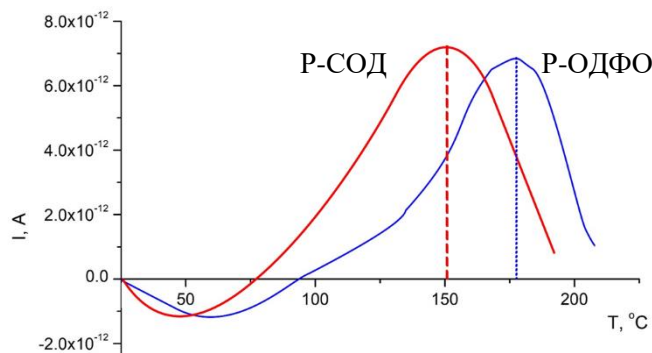


Рисунок 17 Спектры токов ТСД термопластичных аморфных пленок Р-ОДФО и Р-СОД

На спектрах токов ТСД (Рисунок 17) наблюдается инверсия направления тока. Условно положительное направление тока соответствует движению носителей заряда через толщу диэлектрика, так как ток измерялся в открытой цепи. В области низких температур отрицательное направление тока может соответствовать разрушению остаточной поляризации или движению носителей через приповерхностный слой образца.

Высокотемпературный максимум анализировался на основе кинетики релаксации заряда первого порядка. При этом ток ТСД может быть описан выражениями 6 и 7.

$$J_{TSD} = J_{\max} \exp\left[\frac{W}{k} \left(\frac{1}{T_{\max}} - \frac{1}{T}\right)\right] \times \exp\left\langle -\frac{W}{kT_{\max}^2} \int_{T_{\max}}^T \exp\left[\frac{W}{k} \left(\frac{1}{T_{\max}} - \frac{1}{T'}\right)\right] dT' \right\rangle, \quad (6)$$

где максимальная плотность тока  $J_{\max}$  может быть записана как:

$$J_{\max} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\varepsilon_{lay}U_{e0}}{(\varepsilon h_{lay} + \varepsilon_{lay}h)} \times \exp\left\langle -\frac{W}{kT_{\max}^2} \int_{T_0}^{T_{\max}} \exp\left[\frac{W}{k} \left(\frac{1}{T_{\max}} - \frac{1}{T'}\right)\right] dT' \right\rangle, \quad (7)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T_0$  и  $T'$  – начальная и текущая температуры, соответственно;  $T_{\max}$  – температура максимума плотности тока  $J_{\max}$ ;  $\varepsilon_{lay}$ ,  $h_{lay}$  – диэлектрическая проницаемость и толщина прокладки соответственно,  $U_{e0}$  – начальное значение электростатической разности потенциалов.

Величины  $J_{\max}$  и  $T_{\max}$  определялись из экспериментально измеренной кривой тока ТСД. Значения энергии активации, рассчитанные методом «подгонки» из спектров ТСД термопластичных пленок Р-ОДФО и Р-СОД составляют  $W \approx 0.8$  и  $0.6$  эВ.

## Электрическая прочность термопластичных пленок полиимида

Пробой проводился на переменном напряжении частотой 50 Hz в комнатных условиях при выборке образцов  $N = 10$ . Для определения электрической прочности пленок ПИ полученные результаты, представленные в координатах Вейбулла, приведены на рисунке 18.

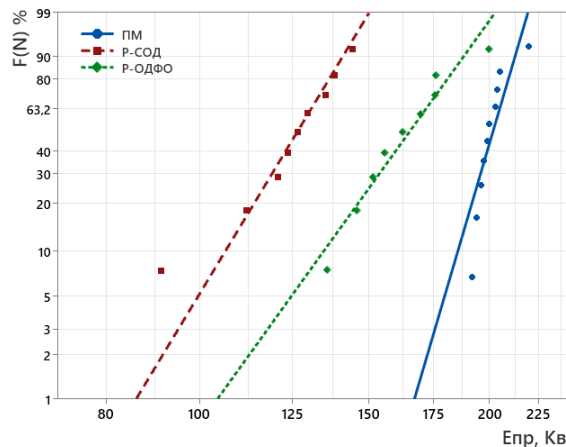


Рисунок 18. Распределение Вейбулла по  $E_{пр}$  пленок Р-ОДФО, Р-СОД и ПИ

Значения кратковременной электрической прочности  $E_{пр}$ , соответствующие вероятности 63,2%, пленок Р-ОДФО и промышленного ПИ незначительно отличаются и составляют 205 и 173 кВ/мм соответственно. Величина  $E_{пр}$  пленки Р-СОД равна 138 кВ/мм, что может быть обусловлено более высокой удельной проводимостью этой пленки.

В **Приложении А** приведено описание разработанной схемы прибора, изготовленного в металлическом корпусе, предназначенного для измерения напряжения саморазряда ( $U_c$ ) и восстановленного напряжения ( $U_{вос}$ ) (рисунок 20). Зависимости  $U_c(t)$  и  $U_{вос}(t)$  используются как диагностические неразрушающие методы контроля свойств изоляции. Указаны технические данные прибора: испытательное напряжение - 5 В; минимальная емкость объектов испытаний - 500 пФ, входное сопротивление прибора -  $10^{13}$  Ом, входная емкость - 12 пФ. Подробно описана блок-схема прибора (рисунок 19), схема управления и блок релейной коммутации. Разработана инструкция по проведению измерения  $U_c(t)$  и  $U_{вос}(t)$ .

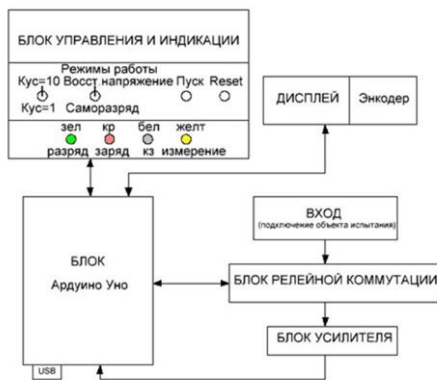


Рисунок 19. Блок-схема прибора Абсорбция-3/23



Рисунок 20. Внешний вид прибора Абсорбция-3/23

Отличительной особенностью прибора "Абсорбция-3/23" является использование нового метода регистрации зависимостей  $U_c(t)$  и  $U_{вос}(t)$ . Приведен подробный обзор современных промышленных приборов, предназначенных для измерения абсорбционных характеристик.

В работе представлено подробное описание устройства и отмечены его отличительные особенности. Высокая точность регистрации обеспечивается за счет использования программы, написанной на языке "С", платы Ардуино УНО, а также ряда компонентов с высокоомным входом – реле марки "LI05-1A85" и операционный усилитель марки "LMC6041".

Приложение А не только содержит описание нового прибора для регистрации абсорбционных характеристик, но также подробно описывает принцип его работы, реализацию программы управления и проверку через тестовые испытания. Использование прибора дает возможность подробного анализа измеряемых характеристик и явлений саморазряда и восстановленного напряжения.

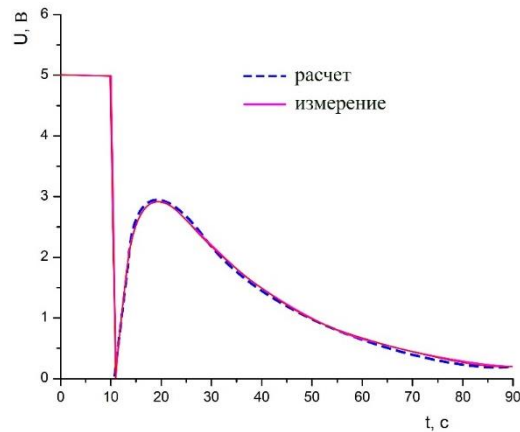


Рисунок 21. Кривая, полученная в результате испытания реальной эквивалентной схемы на приборе АБСОРБЦИЯ-3/23

Для проверки работоспособности прибора была изготовлена тестовая эквивалентная схема из конденсаторов и резисторов. Измеренная и расчетная зависимости  $U_{\text{вос}}(t)$  представлены на рисунке 21(a,b). Измерения, полученные с помощью прибора “Абсорбция-23/3” и зависимость  $U_{\text{в}}(t)$ , полученная с использованием Мисгосар-12, совпадают, что подтверждает корректность работы прибора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые изучены процессы электропереноса, накопления и релаксации заряда, абсорбционные и электретные свойства новых отечественных термопластичных полиимидных пленок Р-СОД и Р-ОДФО, изготовленных в лаборатории Филиала НИЦ “Курчатовский институт” - ПИЯФ - ИВС.

Изучена совокупность абсорбционных характеристик  $I_{\text{зар}}(t)$ ,  $I_{\text{раз}}(t)$ ,  $U_{\text{с}}(t)$ ,  $U_{\text{вос}}(t)$  термопластичных аморфных полиимидных пленок Р-ОДФО и Р-СОД, изготовленных методом полива раствора на стекло, в интервале температур от 25°С до 200°С при напряжённости электрического поля  $E=10^5$  В/м.

Получены температурные зависимости проводимости  $\gamma=f(T)$  аморфных ТП пленок Р-СОД и Р-ОДФО и показано, что величина проводимости  $\gamma$  этих пленок на порядок выше, чем у терморезистивного полиимида ПМ. Эти зависимости носят криволинейный характер при  $T < T_{\text{с}}$ . Разница значений  $\gamma$  пленок Р-СОД и Р-ОДФО возрастает в температурном интервале с 25 °С до 200 °С. В области  $T_{\text{с}}$  электропроводность пленок Р-СОД на порядок выше, чем у Р-ОДФО. Установлено, что у ТП ПИ явно выраженный криволинейный характер зависимости проводимости от температуры наблюдается существенно ниже  $T_{\text{с}}$  (при  $T > 125$  °С). Можно полагать, что этот эффект обусловлен диссоциацией примесей, а, следовательно, и увеличением количества носителей заряда.

Абсорбционные характеристики проанализированы на основе современных физических моделей, эквивалентных схем Фойгта и Максвелла. Рассчитаны параметры этих схем. Установлено, что времена релаксации  $\tau$  значительно уменьшаются с ростом температуры.

На основе параметров схемы Фойгта получены зависимости  $\varepsilon'(\omega)$  и  $\varepsilon''(\omega)$  в области сверхнизких частот ( $10^{-4} - 10^{-1}$ ) Гц, описываемые спадающими кривыми. Дисперсионная кривая  $\varepsilon'(\omega)$  с повышением температуры смещается в область более высоких частот, что указывает на наличие релаксационной поляризации. Показано, что накопление заряда обусловлено поляризацией Максвелла Вагнера с учетом повышенной проводимости приповерхностных слоев диэлектрика.

Получена температурная зависимость коэффициентов абсорбции  $k_a$ . Установлено, что значения  $k_{a \text{ аб}}$  и  $k_{a \text{ пр}}$  растут с увеличением температуры от 25°C до 200°C. Значения  $k_a$ , определённые по методу восстановленного напряжения описываются кривой с максимумом. Информация о  $k_a$  имеет практическое значение при использовании данных материалов в качестве изоляции в различных электротехнических конструкциях.

Изучена стабильность электретного состояния новых термопластичных пленок и термореактивных пленок ПМ, заряженных в коронном разряде. На основе полученной зависимости рассчитана зависимость проводимости от времени в интервале температур ниже  $T_c$ .

Релаксация заряда пленок Р-ОДФО и Р-СОД определена как в изотермическом, так и в термоактивационном режимах. Из полученных результатов следует, что величины энергии активации процессов релаксации заряда, накопленного в образцах под действием коронного разряда, пленок Р-ОДФО и Р-СОД близки и составляют  $W \approx 0.8$  и  $0.6$  эВ соответственно.

В результате проведённых испытаний установлено, что при действии коронного разряда и в электрическом поле ( $E=10^5$  В/м) в области температур  $T < T_c$  в образце накапливается гомозаряд. Релаксация этого заряда обусловлена поляризацией Максвелла-Вагнера. Времена релаксации гомозаряда в плёнках Р-ОДФО и Р-СОД ниже, чем у промышленного ПМ, поэтому термопластичные полиимиды предпочтительнее в электротехнике там, где нежелателен объёмный заряд — например, в подложках интегральных схем.

Определены значения электрической прочности термопластичных пленок Р-ОДФО, Р-СОД и термореактивного ПМ. Установлено, что значение электрической прочности  $E_{пр}$  пленок термореактивного полиимида близки с  $E_{пр}$  пленок Р-ОДФО (205 и 173 кВ/мм соответственно). Таким образом новые отечественные термопластичные материалы могут быть использованы вместо термореактивных ПИ, тем самым расширяя область применения полиимидов (за счет возможности создания изоляции сложной формы и способности к переработке).

Результаты проведённой работы использовались в учебном процессе Высшей школы высоковольтной энергетики СПбПУ в курсе Физики Диэлектриков. С учетом полученной при исследовании информации был разработан и изготовлен прибор Абсорбция-3/23 с входным сопротивлением 10 ТОм, обеспечивающий высокую точность режима измерения  $U_c(t)$  и  $U_{\text{воч}}(t)$  образцов и конденсаторов с ёмкостью  $C=500$  пФ при напряжении  $U=5$ В. Данный прибор предназначен для учебного процесса. Получено свидетельство № 2023685981 о государственной регистрации программы для ЭВМ «ABSORPTION CONTROL». Дата регистрации: 01.12.2023.

**СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ  
ДИССЕРТАЦИИ**

1. Borisova M. E., Kamalov A. M., Jayasinghe B. M. D. N. S. Electrical and electret properties of non-woven “spunbond” polypropylene // IEEE RTU-CON-2018. Riga, Latvia, 2018. — DOI:10.1109/RTUCON.2018.8659873.
2. Borisova M. E., Kamalov A. M., Jayasinghe B. M. D. N. S., Pintoré A. D. Relaxation processes in polypropylene films manufactured by different manufacturers // 14th St. Petersburg International Conference of Young Scientists “Modern Problems of Polymer Sciences”. Russia, 2018.
3. Borisova M. E., Kamalov A. M., Jayasinghe B. M. D. N. S. Effect of synthesis technology on the conductivity of thermoplastic polyimide films // 15th St. Petersburg International Conference of Young Scientists “Modern Problems of Polymer Sciences”. Russia, 2019
4. Borisova M. E., Kamalov A. M., Jayasinghe B. M. D. N. S. Near-electrode polarization and determination of the mobility of intrinsic charge carriers in PVDF films // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1695, No. 1. — P. 012149. — DOI:10.1088/1742-6596/1695/1/012149.
5. Borisova M., Didenko A., Jayasinghe B. M. D. N. S., Vaganov G., Yudin V. Dielectric characteristics of thermoplastic polyimide R-BAPB in the low frequency // AIP Conference Proceedings. — 2020. — Vol. 2308. — P. 030014.
6. Borisova M., Jayasinghe B. M. D. N. S., Didenko A., Vaganov G., Yudin V. Dielectric characteristics of thermoplastic polyimide R-BAPS and R-BAPB films in the low frequency range // 2021 ElConRus. Russia, 2021. — DOI:10.1063/5.0033357.
7. Borisova M., Kamalov A., Kibirev A., Jayasinghe B. M. D. N. S., Smirnova V. Homocharge relaxation in polyimide films with different macromolecule rigidity // 2021 ElConRus. Russia, 2021. — DOI:10.1109/ElConRus51938.2021.9396629.
8. Borisova M., Kamalov A., Jayasinghe B. M. D. N. S., Chiriateva A. Charge relaxation and kinetic accumulation of non-woven polypropylene and polyimide films // 2022 ElConRus. Russia, 2022. — DOI:10.1109/ElConRus54750.2022.9755471.
9. Борисова М. Э., Джайасингхе Б. М. Д. Н. С., Диденко А. Л., Камалов А. М., Павлов А. А. Абсорбционные и низкочастотные диэлектрические характеристики термопластичных полиимидов Р-СОД И Р-ОДФО // 16th St. Petersburg International Conference of Young Scientists “Modern Problems of Polymer Sciences”. Russia, 2022.
10. Борисова М. Э., Павлов А. А., Джайасингхе Б. М. Д. Н. С. Электрические и электретные свойства пленок полиимида // IX Международная научно-практическая конференция “Новые полимерные композиционные материалы — Микитаевские чтения”. Эльбрус, Россия, 2023.
11. Бондаренко П. Н., Джайасингхе Б. М. Д. Н. С., Джаясингхе Д. Т., Борисова М. Э., Павлов А. А. Absorption Control : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023685981 / ФГАОУ ВО

«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». — Российская Федерация, 2023.

12. Borisova M., Kraft V., Vaganov G., Jayasinghe B. M. D. N. S. Electrical and Electret Properties of Polypropylene and Polyimide Nonwovens // 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon). Saint Petersburg, Russian Federation, 2024. — P. 606–608. — DOI:10.1109/ElCon61730.2024.10468224.
13. Крафт В. Е., Джайасингхе Б. М. Д. Н. С., Борисова М. Э., Ваганова Г. В. Накопление и релаксация заряда в плёночных и волокнистых полиимидах // Глобальная энергия. — 2025. — Т. 31, № 2. — С. 70–84. — DOI:10.18721/JEST.31206.
14. Борисова М. Э., Крафт В. Е., Джайасингхе Б. М. Д. Н. С. Экспериментальное и теоретическое изучение электропереноса в полиимидных пленках и композиционных материалах // ПОЛИКОМТРИБ-2025. Гомель, Беларусь, 2025.
15. Борисова М. Э., Джайасингхе Б. М. Д. Н. С., Диденко А. Л., Крафт В. Е. Абсорбционные характеристики термопластичных полиимидных плёнок // Электричество. — 2025. — № 12. — С. 38–49. — DOI:10.24160/0013-5380-2025-12-38-49.