

ВПЛИВ МОРФОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ КОНДЕНСАТОРНИХ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК НА ЇХ ДЕФОРМАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ

Мета роботи – вивчення деформаційних властивостей полімерних плівок в умовах, що моделюють експлуатацію електротехнічних пристроїв.

Методи досліджень – експериментальні з обробкою результатів засобами математичної статистики.

Отримані результати свідчать про особливості структури полімерних плівок і дозволяють прогнозувати більш високу термостабільність механічних і електрофізичних характеристик плівкової просоченої діелектричної системи на основі гладкої поліпропіленової плівки у порівнянні з іншими вивченими.

Наукова новизна. Встановлене принципове розходження гістограм частот реалізації відносного подовження при розриві досліджених плівок дозволяє використати зазначену характеристику як параметр, що ідентифікує наявність або відсутність щільного кристалічного шару в діелектричній плівці в її первинному стані.

Практична значимість. Спосіб діагностики структури полімерних плівок у первинному стані, заснований на вивченні відносного подовження плівки при розриві, відрізняється від традиційних простотою застосування при високій відтворюваності результатів і є перспективним для здійснення вхідного контролю якості полімерних плівок при виробництві силових конденсаторів.

Ключові слова: полімерні плівки, відносне подовження при розриві, плівковий діелектрик

ВСТУП

Численні наукові й практичні розробки останніх років розширили уявлення про електроізоляційні полімери, екологічно чисті газостійкі просочуючі рідини й перспективні діелектрики на їх основі, які призначені для конденсаторобудування [1]. Так, впровадження у виробництво силових косинусних конденсаторів двовісноорієнтованих поліпропіленових плівок, просочених синтетичними газостійкими ароматичними рідинами (наприклад, фенілксилілетаном або сумішшю моно- і дибензилтолуолу), дозволило збільшити робочу напруженість електричного поля в діелектрику до значень 70 кВ/мм і вище.

Вибір твердих і рідких ізоляційних матеріалів обумовлений вдалим поєднанням їхніх електрофізичних характеристик. Неполарній поліпропіленовій (ПП) плівці притаманні висока електрична міцність, низькі діелектричні втрати, відносно висока теплостійкість, висока межа міцності й мале відносне подовження при розтяганні, що необхідно для намотування конденсаторних секцій. Поліпропіленова плівка відносно дешева й успішно піддається модифікації різними способами. Однак, відзначається залежність властивостей ПП плівки від способу виготовлення й особливо від вмісту в ній атактичної та ізотактичної фаз поліпропілену. Застосування полярної поліетилентерефталатної (ПЕТ) плівки при виготовленні імпульсних силових конденсаторів, конденсаторів постійного струму та інших електротехнічних виробів обумовлено насамперед її досить високою діелектричною проникністю, рівнотовщинністю, механічною та електричною

міцністю, незначною усадкою при підвищених температурах, високим питомим об'ємним електричним опором [2]. При використанні полімерних матеріалів в якості ізоляції необхідно пам'ятати, що полімери можуть перебувати у твердому й рідкому агрегатному станах, кристалічному й аморфному фазових станах, склоподібному, високоеластичному й в'язкотекучому деформаційному фізичному станах. Основним чинником, що пояснює ряд найважливіших особливостей полімерів, є різноманіття їх надмолекулярних структур. Стереорегулярні полімери, до яких відносяться поліпропілен і поліетилентерефталат, здатні до кристалізації. У кристалічних областях полімерів співіснують різні типи надмолекулярних утворень. Аморфна фаза полімерів являє собою відносно впорядковану систему, первинним утворенням якої є пачки – довгі пучки витягнутих макромолекул (у випадку переваги сил міжмолекулярної взаємодії) або глобули (при перевазі сил внутрішньомолекулярної взаємодії) – статистичні клубки згорнутих макромолекул. За певних умов аморфні пачки здатні групуватися у більш складні структурні утворення – фібрили, дендрити, смугасті структури. Одному й тому самому ступеню кристалічності полімерної плівки відповідають різні області впорядкування й різні надмолекулярні структури. При цьому будь-яка надмолекулярна структура визначається одночасно молекулярною будовою полімеру і умовами його утворення (швидкістю охолодження, часом витримки в розплаві, числом переплавлень), причому прогрів полімеру дуже впливає на процес структуроутворення на всіх стадіях. Відзначаються випадки зміни над-

молекулярних структур полімерних матеріалів навіть у ході їхнього зберігання відповідно до вимог нормативних документів.

Механічна міцність та відносне подовження полімерів значним чином пов'язані з їхніми морфологічними особливостями: типом структури, орієнтацією, кристалічністю, молекулярною масою, числом «прохідних» макромолекул (тобто ланцюгів, що входять в аморфні ділянки між кристалічними) [3]. Однак, зв'язок конкретних структурних параметрів полімерного матеріалу із процесами його руйнування дотепер недостатньо вивчений, хоча становить значний інтерес.

В ІПТГ НАН України розпочато розробку комплексних заходів, що спрямовані на підвищення працездатності плівкових високовольтних імпульсних конденсаторів із просоченням, які базуються на чітких уявленнях про природу й характер деструктивних процесів у діелектрику. Встановлено [4, 5] що в силових (у тому числі, високовольтних імпульсних) конденсаторах із просоченням синтетичними рідинами, що мають високий ступень хімічної спорідненості із просочуючою полімерною плівкою, процес руйнування просочуючого діелектрика відбувається як за рахунок термоокислювальної деструкції, так і внаслідок термостимульованої взаємодії твердих і рідких компонентів. Інтенсивність такої термостимульованої взаємодії багато в чому визначається не тільки хімічним складом і будовою компонентів діелектричної системи [4], але й морфологічними особливостями плівки [5].

МЕТА

Метою даної роботи є вивчення деформаційних властивостей полімерних плівок в умовах, що моделюють експлуатацію електротехнічних пристроїв. Вивчення реологічних характеристик конкретної полімерної плівки дозволить одержати важливу інформацію про морфологічні особливості діелектричного матеріалу (які впливають і на його електрофізичні властивості, важливі для подальшого електротехнічного використання) без застосування проблемних з економічної та експлуатаційної точок зору методів.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

При аналізі деформаційних характеристик плівок застосовувалася розривна машина, що дозволяла фіксувати подовження зразка в момент його руйнування («машина Шоппера»). Вимір відносного подовження при

розриві полімерних плівок проводився згідно ГОСТ 14236-81 «Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение». Похибка визначення розривного подовження становить 0,5 мм. Параметри зразків (15 x 150 мм) визначалися формою захватів розривної машини та мінімальною відстанню між ними. Відносне подовження при розриві (ε_p) визначалося як відношення подовження зразка в момент розриву, до довжини зразка у вихідному стані. Аналогічні вимірювання і розрахунки проводилися для зразків плівки у вихідному стані, а також для зразків, що були піддані термостарінню в середовищі трансформаторного масла Т-1500 протягом 150, 300 годин. При виготовленні зразків були використані наступні плівки: №1 – слабкошорстка поліетилентерефталатна завтовшки 8 мкм; №2 – гладка поліетилентерефталатна завтовшки 10 мкм; №3 – гладка поліпропіленова завтовшки 10 мкм; №4 – двобічношорстка двовісноорієнтована поліпропіленова завтовшки 10 мкм. Відомості про внутрішню будову даних плівок відсутні. Для кожної плівки на кожному етапі досліджень (вихідний стан, термостаріння в середовищі трансформаторного масла протягом 150 та 300 годин) було підготовлено й випробувано 100 зразків, що обумовлено фазовою неоднорідністю досліджуваних об'єктів, тому обов'язковим було використання статистичних методів обробки отриманих експериментальних результатів, які б дозволяли урахувати випадковий характер параметра, що аналізується. На практиці було використано метод побудови гістограм частот реалізації конкретних значень відносного подовження зразків плівки при їхньому розтягуванні до розриву. Для побудови гістограм частот реалізації вісь абсцис розбивали на неперетинні інтервали однакової довжини h , а на осі ординат відкладали висоту v/Nh , де v – число елементів варіаційного ряду, що потрапили у інтервал h , а N – загальна кількість конкретних значень величини, що досліджується (відносного подовження плівки).

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Досліджувані поліетилентерефталатні плівки (№1 і №2) мають досить широкий діапазон зміни відносного подовження при розриві (табл. 1, 2). Отримані дані свідчать про деяку близькість їхньої структури – має місце не яскраво виражена дискретність у зміні ε_p . При цьому слабкошорсткувата плівка №1 показує менше подовження при розриві в порівнянні із гладкою плівкою №2.

Таблиця 1 – Інтервальний варіаційний ряд для відносного подовження при розриві плівки №1

Відносне подовження при розриві (інтервали), %	Абсолютна частота реалізації	Відносна частість реалізації
0,5 – 3,5	25	0,25
3,5 – 6,5	27	0,27
6,5 – 9,5	18	0,18
9,5 – 12,5	6	0,06
12,5 – 15,5	7	0,07
15,5 – 18,5	5	0,05
18,5 – 22,5	12	0,12
Σ	100	1

Це дозволяє припустити, що наявність штучно сформованого профілю поверхні плівки послабляє її деформаційні властивості, однак, для підтвердження цієї гіпотези необхідно мати точну інформацію про рельєф шорсткості. Різні форми профілю неоднорідностей, наприклад, гострі або овальні мікро западини, можуть обумовлювати різний ступінь стійкості до деформаційного впливу. Спектр значень відносного подовження при розриві для плівок №1 і №2 широко «розмитий» (рис. 1).

Подібний вид гістограм частот реалізації значень відносного подовження при розриві відображає наявність великої кількості фіксованих рівнів міцності в матеріалі. Отримані результати свідчать про відносну близькість структури досліджуваних зразків не зважаючи на розходження в морфології поверхні.

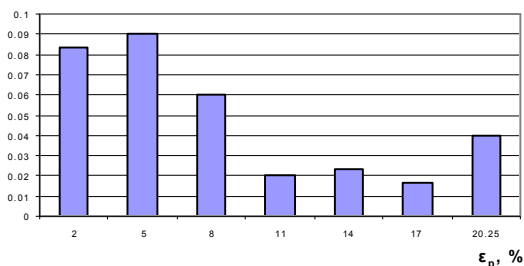
Привертає увагу той факт, що для двобічношорсткої поліпропіленової плівки №4 (табл. 3) з традиційною для конденсаторобудування морфологією поверхні має місце дуже широкий діапазон зміни відносного подовження при розриві – до 45%. Якщо врахувати, що максимальний ступінь кристалічності поліпропілену сягає 82 %, а в технічних плівках не перевищує 78 %, то при такому співвідношенні кристалічних та аморфних ділянок у діелектричному матеріалі звичайної морфології завжди існують наскрізні включення по аморфній фазі, які і є «слабкими» структурними елементами. Наявність таких структурних елементів є одним з вагомих чинників, що обумовлюють механічні властивості плівки.

Необхідно зазначити, що у той же час для зразків гладкої поліпропіленової плівки №3 відзначається надзвичай-

Таблиця 2 – Інтервальний варіаційний ряд для відносного подовження при розриві плівки №2

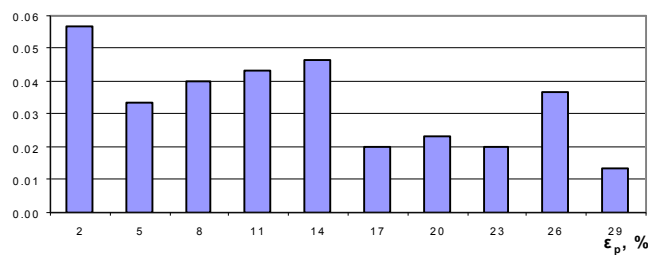
Відносне подовження при розриві (інтервали), %	Абсолютна частота реалізації	Відносна частість реалізації
0,5 – 3,5	17	0,17
3,5 – 6,5	10	0,1
6,5 – 9,5	12	0,12
9,5 – 12,5	13	0,13
12,5 – 15,5	14	0,14
15,5 – 18,5	6	0,06
18,5 – 21,5	7	0,07
21,5 – 24,5	6	0,06
24,5 – 27,5	11	0,11
27,5 – 30,5	4	0,04
Σ	100	1

v/Nh



а) плівка № 1

v/Nh



б) плівка № 2

Рисунок 1 – Гістограма частот реалізації значень відносного подовження при розриві поліетиленерефталатних плівок №1 і №2 у вихідному стані

Таблиця 3 – Інтервальний варіаційний ряд для відносного подовження при розриві плівки №4

Відносне подовження при розриві (інтервали), %	Абсолютна частота реалізації	Відносна частість реалізації
2,5 – 7,5	24	0,24
7,5 – 12,5	28	0,28
17,5 – 22,5	16	0,16
22,5 – 27,5	11	0,11
27,5 – 32,5	8	0,08
32,5 – 37,5	4	0,04
37,5 – 42,5	7	0,07
42,5 – 47,5	2	0,02
Σ	100	1

но вузький діапазон відносного подовження зразків (табл. 4), а самі значення ϵ_p невисокі – більша частина зразків (52 %) показала відносне подовження від 5,5 до 11,5 %. Тобто можна припустити, що ця поліпропіленова плівка має значно менше «слабких» структурних елементів, ніж поліпропіленова плівка № 4.

В будь-якому полімерному плівковому матеріалі аморфні ділянки більш еластичні, менш щільні й структурно неоднорідні у порівнянні із кристалічними, що, очевидно, і в даному випадку пояснює «розмиті» гістограми частот реалізації значень ϵ_p плівки №4 (рис. 2), тут слабкі місця структури (якими є аморфні ділянки) варто розглядати як осередки локальної перенапруги. Для поліпропіленової плівки № 3 спостерігаються три чітко виражені смуги частот реалізації значень ϵ_p (рис. 2).

Якщо розглядати кожну пласку ділянку варіаційного ряду, як ознаку наявності особливостей мікро- та макроструктури [6], то гістограми частот (які ілюструють частоту появи близьких значень відносного розривного подовження зразків) дозволяють констатувати наявність морфологічних особливостей у досліджуваних плівках (рис. 1, 2). Дійсно, оскільки за механічні властивості полімерного матеріалу відповідають макромолекули, що проходять через аморфні ділянки і саме аморфна фаза забезпечує еластичність полімеру, то широко «розмиті» гістограми для плівок № 1, 2 і 4 можна пояснити морфо-

логічним різноманіттям аморфних фрагментів у полімері, у тому числі – наявністю наскрізних включень по аморфній фазі. Для плівки № 3 гістограма має вигляд чітко виражених смуг з вузьким діапазоном зміни ϵ_p , тобто можна припустити більш впорядковану структуру цього полімерного матеріалу.

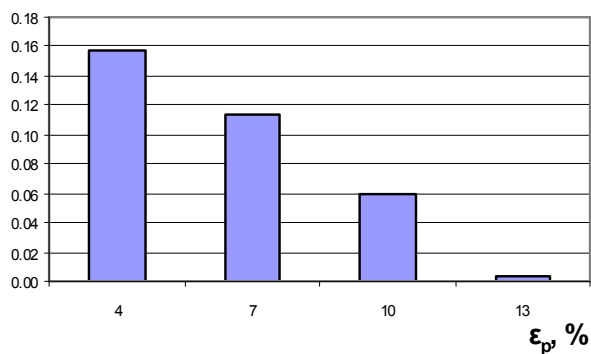
Вивчення відносного подовження при розриві досліджуваних плівок у ході їх термостаріння в середовищі просочуючої рідини показало, що побудовані для відносного подовження при розриві варіаційні ряди збільшують свій розмах за рахунок збільшення значень максимального ϵ_p . Це спостереження характерно для всіх досліджуваних плівок, причому в міру збільшення строку термостаріння збільшується також діапазон абсолютних значень відносного подовження. Такий характер змін притаманний в тому або іншому ступені для всіх досліджуваних плівок, однак, найбільш виражений для плівки № 4, а слабкіше всього проявляється при термостарінні плівки № 3 у середовищі трансформаторного масла.

Таким чином, можна говорити про особливу структуру плівки № 3, тобто про наявність зміцнюючого кристалічного «каркасу». Наявність яскраво вираженого дискретного набору рівнів деформації у випадку плівки № 3 можна пояснити, наприклад, наявністю високощільного кристалічного шару на поверхні матеріалу, характеристики саме цього шару визначають вид гістограми

Таблиця 4 – Інтервальный варіаційний ряд для відносного подовження при розриві плівки №3

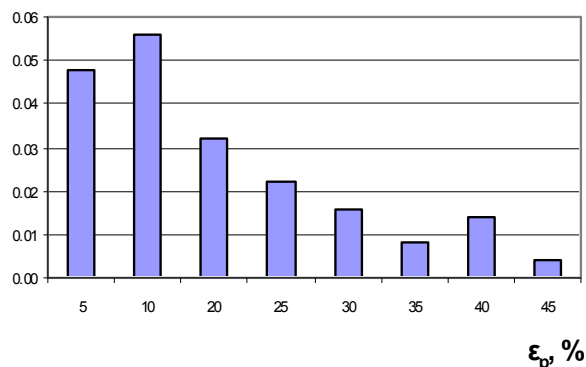
Відносне подовження при розриві (інтервали), %	Абсолютна частота реалізації	Відносна частість реалізації
2,5 – 5,5	47	0,47
5,5 – 8,5	34	0,34
8,5 – 11,5	18	0,18
11,5 – 14,5	1	0,01
Σ	100	1

v/Nh



а) плівка № 3

v/Nh



б) плівка № 4

Рисунок 2 – Гістограма частот реалізації значень відносного розривного подовження поліпропіленових плівок № 3 і № 4 у вихідному стані

частот реалізації значень ε_p . Такі данні про структуру поверхні поліпропіленової плівки № 3 збігаються та суттєво доповнюють матеріали, отримані при вивченні залежності термостабільності її електрофізичних властивостей (а саме короткочасної електричної міцності) в ході старіння в контактi із трансформаторним маслом Т-1500 [5].

ВИСНОВКИ

Наведені в даному дослідженні результати побічно свідчать про особливості структури полімерних плівок, але дозволяють прогнозувати більш високу термостабільність механічних і електрофізичних характеристик плівкової просоченої діелектричної системи на основі поліпропіленової плівки № 3 у порівнянні з іншими варіантами. Встановлене принципове розходження гістограм частот реалізації ε_p досліджених плівок дозволяє використати зазначену характеристику як параметр, що ідентифікує наявність або відсутність щільного кристалічного шару в діелектричній плівці в її первинному стані. Слід зазначити, що спосіб діагностики структури полімерних плівок у первісному стані, заснований на вивченні відносного подовження плівки при розриві, буде відрізнятися від традиційних простотою застосування при високій відтворюваності результатів і є перспективним для здійснення вхідного контролю якості полімерних плівок при виробництві силових конденсаторів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Andreev A. M. Degradation of the impregnated polypropylene insulation of power capacitors under operating conditions / A. M. Andreev, N. M. Zhuravleva, M. Yevtich // Electrical Technology Russia. – 2002. – № 3. – P. 96–106; Laghari J. R. A review of AC and pulse capacitor technology / J. R. Laghari // Appl. Phys. Comm. – 1986. – Vol. 6., № 2. – P. 213–251.
2. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – В 3 т. – Т.2. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 467 с.
3. Гуль В. Е. Структура и прочность полимеров / В. Е. Гуль. – М.: Химия, 1978. – 326 с.
4. Малюшевська А. П., Дмитрішин О. Я., Топоров С. О. Дослідження впливу підвищених температур на експлуатаційні властивості трансформаторного масла Т-1500 в плівкових ізоляційних системах. – Електротехніка та електроенергетика. – №1. – 2015. – С. 21–25.
5. Малюшевська А. П., Топоров С. О. Вплив складу і морфології конденсаторних полімерних плівок на термостабільність їх короткочасної електричної міцності– Електротехніка та електроенергетика. – 2016. – №1 – С. 18–24.
6. Цой Б., Карташов Э. М., Шевелев В. В., Валишин А. А. Разрушение тонких полимерных пленок и волокон. – М.: Химия, 1997. – 342 с.

Малюшевская А. П.¹, Ющишина А. Н.²

¹К.т.н. доцент, старший научный сотрудник Института импульсных процессов и технологии, дй НАН Украины

²К.х.н., доцент, старший научный сотрудник Института импульсных процессов и технологий НАН Украины

ВЛИЯНИЕ MORFOЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНДЕНСАТОРНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК НА ИХ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

Цель работы – изучение деформационных свойств полимерных пленок в условиях, моделирующих эксплуатацию электротехнических устройств.

Методы исследований – экспериментальные с обработкой результатов средствами математической статистики.

Полученные результаты свидетельствуют об особенностях структуры полимерных пленок и позволяют прогнозировать более высокую термостабильность механических и электрофизических характеристик пленочной пропитанной диэлектрической системы на основе гладкой полипропиленовой пленки в сравнении с другими изученными.

Научная новизна. Установлено принципиальное различие гистограмм частот реализации относительного удлинения при разрыве исследованных пленок позволяет использовать указанную характеристику как параметр, определяющий наличие или отсутствие плотного кристаллического слоя в диэлектрической пленке в ее начальном состоянии.

Практическая значимость. Способ диагностики структуры полимерных пленок в первоначальном состоянии, основанный на изучении относительного удлинения пленки при разрыве, отличается от традиционных простой применения при высокой воспроизводимости результатов и является перспективным для осуществления входного контроля качества полимерных пленок при производстве силовых конденсаторов.

Ключевые слова: полимерные пленки, относительное удлинение при разрыве, пленочный диэлектрик.

Malyushevska A. P.¹, Yushchishina A. N.²

¹Ph.D., associate professor, senior staff scientist of Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine

²Ph.D., associate professor, senior staff scientist of Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine

INFLUENCE OF MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF POLYMER CAPACITOR FILMS ON THEIR DEFORMATION PROPERTIES

The purpose of the work is the research of deformation properties of polymeric films under the conditions that simulate the operation of electrical devices.

Research methods are the experimental ones with processing of results by means of mathematical statistics.

The obtained results display the peculiarities of the polymer films' structure and allow us to predict the higher stability of the mechanical and electrical characteristics of the film impregnated dielectric systems based on smooth polypropylene film compared with other studied ones.

Scientific novelty. Fundamental difference of histograms of the implementation frequencies of the investigated films' elongation at break is given. It allows to use the specified characteristic as the parameter that determines the presence or absence of the dense crystalline layer in the dielectric film in its initial state.

Practical significance. Method for the polymer films structure diagnosis in original state, based on the study of the film elongation at break, differs from the traditional one by simplicity of use along with high reproducibility of results and is promising for the incoming quality control implementation of polymer films during the manufacture of power capacitors.

Key words: polymer films, comparative elongation at rupture, film dielectric.

REFERENCES

1. Andreev A. M., Zhuravleva N. M., Yevtich M. Degradation of the impregnated polypropylene insulation of power capacitors under operating conditions, *Electrical Technology Russia*, 2002, No 3, pp. 96–106; Laghari J. R., A review of AC and pulse capacitor technology, *Appl. Phys. Comm*, 1986, Vol. 6, No 2, pp. 213–251.
2. *Spravochnik po ehlektrotekhnicheskim materialam*. Ed. by YU. V. Korickogo, V. V. Pasyukova, B. M. Tareeva, Vol. 3, T.2, Moscow, Energoatomizdat, 1987, 467 s.
3. Gul' V. E. *Struktura i prochnost' polimerov*, Moscow, Himiya, 1978, 326 s.
4. Malyushevs'ka A. P., Dmitrishin O. YA., Toporov S. O. Doslidzhennya vplivu pidvishchenih temperatur na ekspluatacijni vlastivosti transformatornogo masla T-1500 v plivkovih izolyacijnih sistemah, *Elektrotehnika ta elektroenergetika*. 2015, No 1, pp. 21–25.
5. Malyushevs'ka A. P., Toporov S. O. Vpliv skladu i morfologii kondensatornih polimernih plivok na termostabil'nist' ih korotkochasnoi elektrichnoi micnosti, *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, 2016, No 1, pp. 18–24.
6. Coj B., Kartashov EH. M., Shevelev V. V., Valishin A. A. Razrushenie tonkih polimernih plenok i volokon, Moscow, Himiya, 1997, 342 s.