

УДК 004.085

І. В. Горбов

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Використання методів прискореного старіння оптичних носіїв для прогнозування їхньої довговічності

Проведено аналіз кліматичних умов прискореного старіння оптичних носіїв і проаналізовано зміни характеристик носіїв під час їхнього штучного старіння. Показано можливість прогнозування терміну зберігання інформації на оптичних носіях і визначення періоду часу, після якого необхідно виконати резервне копіювання інформації.

Ключові слова: оптичний диск, руйнування, термін зберігання, прискорене старіння, кореговані помилки, декодер, екстремальні умови.

Вступ

При довготерміновому зберіганні інформації важливо знати, як довго той чи інший носій може зберігати записану інформацію. У більшості випадків необхідний термін зберігання інформації складає десятки або навіть сотні років. Відповідність носіїв таким значним термінам не може бути визначена прямим спостереженням.

Для архівного збереження інформації можуть використовуватися різні типи компакт-дисків. Більшість руйнівних процесів, що відбуваються в компакт-дисках, таких як пошкодження та відшарування відбиваючого шару, зміна розмірів пітів, погіршення фізичних властивостей полікарбонатної підкладки, суттєво залежать від температури та вологості повітря архівних приміщень [1]. До того ж, однією з характерних причин втрати інформації на дисках з одноразовим і багаторазовим записом, на яких дані реєструються в інформаційному шарі, що змінює свою прозорість під впливом випромінювання лазера під час запису даних, є руйнування та зміна прозорості інформаційного шару із часом. За нормальних умов такі процеси можуть відбуватися протягом десятків років. Але збільшення температури та вологості прискорюють руйнування інформаційного шару через збільшення теплової енергії молекул, саме тому вони найбільше впливають на термін служби носія [2].

© І. В. Горбов

Аналіз умов прискороеного старіння оптичних носіїв

Для моделювання процесів руйнування носія застосовують штучне старіння носіїв під впливом підвищеної температури та відносної вологості. Відповідно до стандарту [3], який використовується для визначення термінів придатності компакт-дисків, застосовують щонайменше п'ять стресових умов штучного старіння. Кількість зразків та додаткова інформація для кожного тесту наведені в табл. 1, де T_{inc} та RH_{inc} відповідно — значення підвищених температури та відносної вологості.

Таблиця 1. Параметри стресових умов

Стресові умови T_{inc} / RH_{inc}	Кількість зразків	Інкубаційний період, год.	Загальний час, год.	Підготовка RH_{int}	Час релаксації, год.
80 °C / 85 % RH	10	500	2000	31 % RH	6
80 °C / 70 % RH	10	500	2000	31 % RH	8
80 °C / 55 % RH	15	500	2000	31 % RH	4
70 °C / 85 % RH	15	750	3000	33 % RH	8
60 °C / 85 % RH	30	1000	4000	36 % RH	11

При виборі температурних режимів враховувалися наступні фактори:

— у заданому температурному діапазоні не повинно відбуватися ніяких фазових змін у середині тестової системи, тобто температура може змінюватися в межах від 0 °C до 100 °C;

— при підвищенні температури пластик не повинен деформуватись.

Зазвичай підкладки компакт-дисків виготовляються з полікарбонату, температура склування якого становить близько 150 °C. Більшість високотемпературних тестів компакт-дисків показує, що верхня межа в 80 °C є придатною для більшості випробувань.

Верхня межа відносної вологості (85 %) обмежена тим, що при її збільшенні спостерігається конденсування краплинок води на холодних частинах системи (віконце для спостереження, кабельні контакти та ін.). Попадання зазначених краплинок на поверхню зразків може викликати помилкові сигнали при зчитуванні.

Протягом випробувань зразки постійно переміщують зі стресових умов, де відбувається їхнє штучне прискорене старіння, до звичайних, де відбувається контроль їхнього стану, і навпаки. Внаслідок таких різких кліматичних перепадів у підкладці та на її межі з відбиваючим шаром може відбуватись абсорбція води. Градієнт концентрації абсорбованої води при зміні температури може викликати значну деформацію диска. Щоб цього уникнути зразки необхідно деякий час утримувати в умовах проміжної відносної вологості RH_{int} . У табл. 2 наведено порядок підготовки зразків перед стресовими умовами та після їхнього закінчення. T_{amb} та RH_{amb} — відповідно температура та відносна вологість зовнішнього середовища, в якому відбувається контроль параметрів дисків.

Відзначимо, що зміна температури та вологості повинні відбуватися лінійно, і відповідні значення не повинні відхилитися більше ніж на 2 °C та 3 % відповідно.

Таблиця 2. Порядок проведення штучного прискореного старіння носіїв

Етап процесу	Температура	Відносна вологість	Час, год.
Початок	T_{amb}	RH_{amb}	–
Зміна температури та вологості	змінюється до T_{inc}	змінюється до RH_{int}	$1,5 \pm 0,5$
Зміна вологості	T_{inc}	змінюється до RH_{inc}	$1,5 \pm 0,5$
Інкубаційний період	T_{inc}	RH_{inc}	табл. 1
Зміна вологості	T_{inc}	змінюється до RH_{int}	$1,5 \pm 0,5$
Релаксація	T_{inc}	RH_{int}	табл. 1
Зміна температури та вологості	змінюється до T_{amb}	змінюється до RH_{amb}	$1,5 \pm 0,5$
Кінець	T_{amb}	RH_{amb}	–

Зміна характеристик оптичних дисків під час штучного старіння

Час виходу з ладу носія визначається моментом появи некорегованих помилок, після якого дані, хоча й можуть бути відтворені, проте записану інформацію частково буде втрачено. Таким чином, термін служби носія визначається як період часу, протягом якого інформація може бути відтворена з носія без жодних втрат. Слід відзначити, що файлові формати крім даних користувача можуть вміщувати також і надлишковий код, який дозволяє додатково виправляти помилки, які не вдалося виправити апаратними декодерами під час відтворення. На рис. 1 наведено аналіз стану записаного диска CD-R SmartBuy, який зберігався 54 місяці в стандартних умовах (температура 20–25 °С, відносна вологість 50–60 %): 4,1 % записаних блоків мають помилки C1/C2, проте лише 3 % записаних файлів мають помилки, тобто 1,1 % пошкоджених блоків було виправлено за рахунок додаткової інформації файлових форматів.

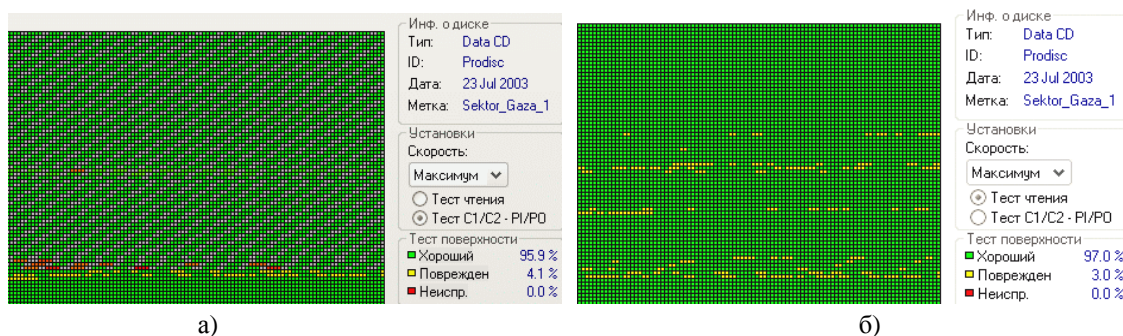


Рис. 1. Аналіз рівня помилок після декодерів першого та другого рівнів (а) та при відтворенні файлів (б)

При здійсненні контролю стану оптичних носіїв необхідно слідкувати за наступними їхніми характеристиками:

— *Jitter* (джитер) — це часова похибка сигналу порівняно з ідеальним опорним сигналом, показник того, як добре піти та ленди визначені на носії. Максима-

льне значення для CD складає 35 нм, для DVD — від 36 нм до 168 нм (9 % довжини піта);

— *BLER* (Block Error Rate, тільки для CD) або *C1* — визначається як кількість блоків даних із помилками, які можуть бути виправлені декодером першого рівня (E11, E21 та E31). Максимальне значення — 220 помилок за секунду;

— *C2* або *E22* — кількість блоків даних із помилками, які можуть бути виправлені декодером другого рівня;

— *E32* (тільки для CD) — це помилки, що неможливо виправити декодером другого рівня. За наявності таких помилок записані дані буде втрачено;

— *PIE* (Parity Inner Error, тільки для DVD) — це кількість рядків парності блоку ECC із помилками (Error Correction Code — код корегування помилок). Максимальне значення для 8 послідовних ECC блоку (PI Sum8) складає 280 помилок;

— *POE* (тільки для DVD) — це кількість стовпчиків парності блоку ECC із помилками. POE не виправляється декодером, тому не допускається жодної такої помилки.

Таким чином, диск виходить із ладу, у випадку коли наведені показники досягають свого максимального значення, або з'являються некореговані помилки. На рис. 2 наведено графіки зростання кількості помилок із часом під впливом підвищеної температури (80 °C) та вологості (85 %) для дисків CD-R [4]. Час руйнування дисків CD-R контролювався за параметром BLER.

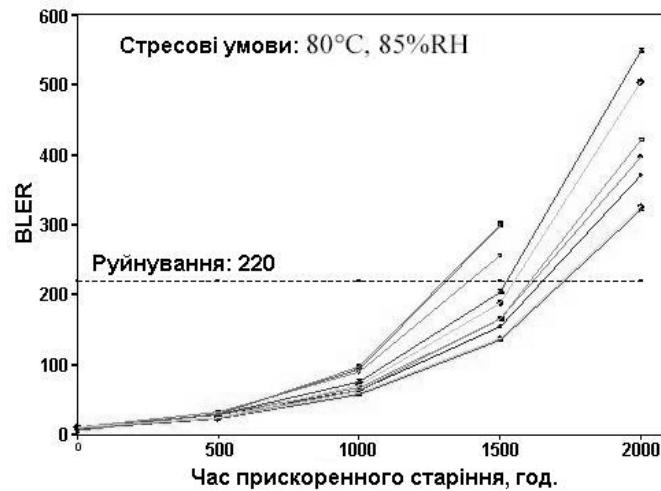


Рис. 2. Збільшення параметра BLER дисків CD-R із часом в умовах підвищеної температури та вологості

Для контролю стану дисків DVD-RAM доцільно слідкувати за параметром BER (Byte Error Rate — частота помилкових байтів), значення BER, що становить $9 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, і відповідає 280 PIE, тобто моменту виходу диска з ладу [5]. На рис. 3 наведено графіки збільшення параметра PIE дисків DVD-R під впливом підвищеної температури та вологості для різних стресових умов.



Рис. 3. Збільшення параметра PIE дисків DVD-R у різних стресових умовах прискореного старіння

Визначення довговічності оптичних носіїв

Для оцінки термінів зберігання компакт-дисків використовується статистичний аналіз і модель прискорених випробувань Ейрінга, яка базується на законах термодинаміки. Рівняння (1) описує модель, що піддається впливу двох факторів: температури та вологості [3]:

$$t_c = AT^{\alpha} e^{\frac{\Delta H}{kT}} e^{-(B+C/T)RH}, \quad (1)$$

де t_c — характеристичний термін служби або масштабний параметр; A , B , C — константи; α — температурний коефіцієнт; ΔH — енергія активації молекули; k — стала Больцмана; T — температура; RH — відносна вологість.

У межах температур штучного старіння компакт-дисків (табл. 1) значення коефіцієнтів α та C прирівнюють до 0. У такому випадку рівняння моделі Ейрінга приймає наступний вигляд:

$$t_c = Ae^{\frac{\Delta H}{kT}} e^{-B \cdot RH}. \quad (2)$$

Візьмемо натуральний логарифм із обох частин рівняння (2) та приведемо до лінійного вигляду:

$$\ln(t_c) = \ln(A) + \frac{\Delta H}{k} T^{-1} - B \cdot RH. \quad (3)$$

Таким чином, логарифм терміну служби носія лінійно залежить від RH та T^{-1} (рис. 4) [6]. Терміном придатності компакт-диска є термін його служби за нормальних умов, тобто при температурі 25 °C та відносній вологості 85 %. Для його визначення необхідно знайти коефіцієнти A , B та ΔH . У найпростішому випадку для цього достатньо розглянути три стресові умови, отримати систему із трьох рівнянь, рішенням якої й будуть необхідні коефіцієнти [5]. Проте такий підхід ха-

рактизується значним рівнем похибок через те, що момент виходу носія з ладу визначається, у першу чергу, кількістю помилок при його зчитуванні, тобто випадковими величинами. Тому для подальшого аналізу треба використовувати статистичні методи.

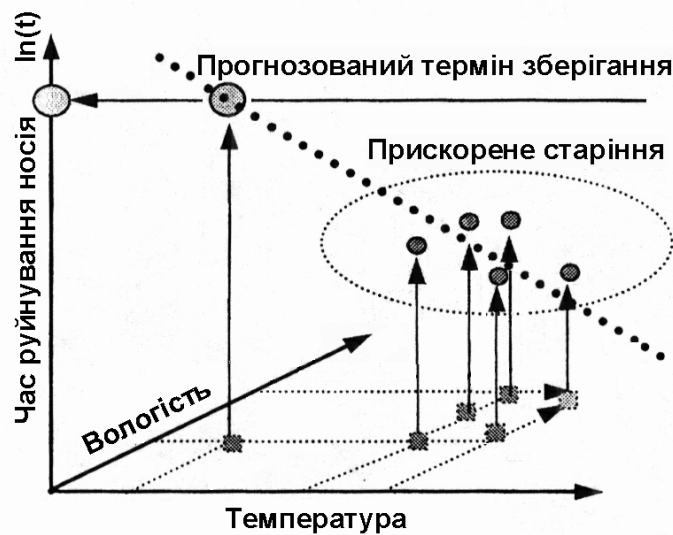


Рис. 4. Залежність часу руйнування від вологості та температури

Для визначення розподілу терміну придатності компакт-диска за часом використовується розподіл Вейбулла, де функція розподілу руйнування носія $F(t)$ має наступний вигляд [6]:

$$F(t) = 1 - e^{-(t/t_c)^m}, \quad (4)$$

де t — час; m — параметр розподілу. Відзначимо, що $F(t_c) = 0,632$ означає, що за момент часу $t = t_c$ зруйновано 63,2 % зразків.

Розподіл Вейбулла характеризується високою ефективністю й широко застосовується для моделювання процесу корозії у тонких металевих плівках. У більшості випадків він використовується для опису моделей, у яких загальне руйнування системи може бути викликано одним із багатьох взаємозалежних факторів. Саме тому, даний розподіл застосовують для прогнозування часу виходу носія з ладу, який також залежить від багатьох взаємозалежних факторів [3].

Для кожної стресової ситуації (табл. 1) експериментально знаходяться значення характеристичного терміну служби. Для визначення очікуваного характеристичного терміну служби за нормальних умов, тобто в режимі 25 °C / 50 % RH, необхідно розв'язати модель Ейрінга методом максимальної правдоподібності регресії температури, відносної вологості та масштабного параметра.

Відношення очікуваного характеристичного терміну служби носія в звичайних умовах до терміну, знайденого експериментально зі стресових умов, називається коефіцієнтом прискорення. Для нормалізування отриманих даних час прискореного руйнування необхідно помножити на відповідний коефіцієнт прискоро-

рення. Для визначення очікуваного розподілу руйнування носія в звичайних умовах згідно отриманих нормалізованих даних будується графік розподілу.

Точність прогнозу терміну придатності залежить від того, як добре модель задовольняє основним припущенням. У моделі Вейбулла важливим припущенням є те, що параметр розподілу m має одне значення для всіх стресових умов. Таке припущення повинно бути перевірено. Найбільш простим методом перевірки незмінності параметра розподілу є метод відношення правдоподібностей, який може бути здійсненим багатьма програмними засобами.

Альтернативний спосіб — це метод інтервалів, у якому порівнюються інтервали довіри параметра розподілу. Якщо інтервал довіри в 95 % для параметра розподілу, який було отримано для одного стресу, частково співпадає з інтервалом для іншого стресу, тоді статистично параметри суттєво не відрізняються. Метод відношення правдоподібностей грубіший ніж метод інтервалів. У випадку якщо програмні засоби недоступні, незмінність параметра розподілу може бути перевірена графічно. При цьому групи з однаковими параметрами розподілу на графіку паралельно зсунені одна відносно іншої.

Якщо існує суттєва різниця між параметрами розподілу, тоді необхідно перевірити оцінки та межі інтервалів довіри для кожного параметра розподілу та визначити чому вони відрізняються. Можливо, що відбулася зміна даних через інший вид руйнування, помилку при вимірюванні або помилку оператора.

Якщо відома функція розподілу руйнування носія із часом $F(t)$, тоді можна визначити долю носіїв, які залишилися в робочому стані на той самий момент часу t за формулою:

$$R(t) = 1 - F(t). \quad (5)$$

Тобто $R(t)$ є вірогідністю того, що принаймні протягом часу t даний диск буде знаходитися в робочому стані. Інтервал довіри розподілу визначається за допомогою методу нормально-асимптотичного наближення.

Авторами в [5] були виконані експерименти зі штучного прискореного старіння носіїв DVD-R. Для статистичного аналізу використовувався логарифмічно нормальний розподіл $f(t)$:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma t} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} \right)^2}, \quad t > 0. \quad (6)$$

Для визначення прогнозованого терміну служби досліджуваних зразків використовують графіки залежності функції вірогідності зберігання носія в межах інтервалу довіри в 90 % від часу (рис. 5 і 6). Відповідно до графіка на рис. 5 прогнозований термін зберігання носія DVD-R за звичайних умов (температура 25 °C, відносна вологість 50 %) складає $19,1 \times 10^5$ год., тобто 218 років, тільки з урахуванням впливу температури та вологості [5].

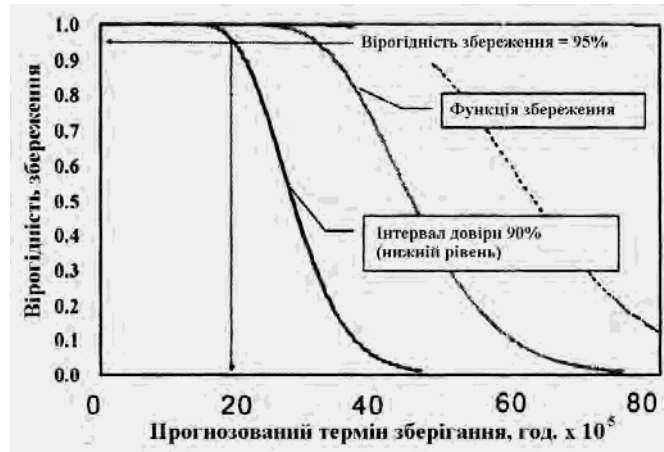


Рис. 5. Залежність вірогідності зберігання носіїв DVD-R від часу

На рис. 6 наведено графіки залежності функції вірогідності зберігання носія DVD-RAM у різних кліматичних умовах: 20 °C / 50 % RH та 30 °C / 60 % RH [7]. Відповідно до графіків термін придатності носія зменшується зі збільшенням температури та вологості, що відповідає фізичній моделі. Прогнозований термін придатності носія DVD-RAM в умовах зберігання при температурі 20 °C та відносній вологості 50 % складає $2,3 \times 10^5$ годин, тобто приблизно 26 років.

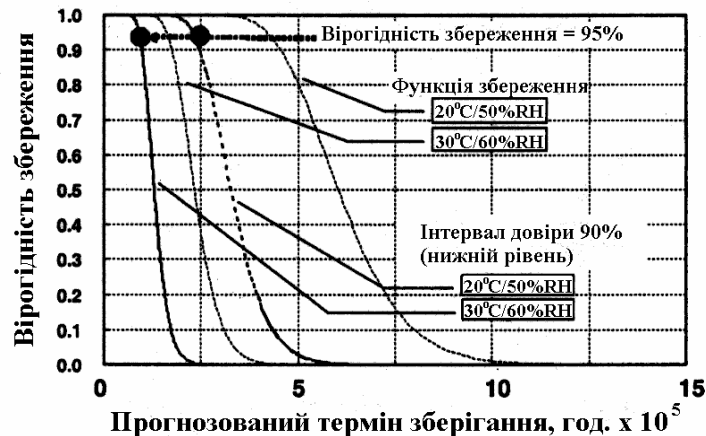


Рис. 6. Залежність вірогідності зберігання носіїв DVD-RAM від часу

У наведену модель руйнування носія включено вплив тільки таких факторів як температура та вологість. Але, як показують дослідження, на термін зберігання інформації на оптичних дисках також може впливати світлове опромінення носія [8]. Не зважаючи на те, що подібний вплив є менш суттєвим, однак опромінення з великою інтенсивністю може викликати локальний нагрів носія і його передчасне руйнування. До того ж, деякі барвники, які використовуються в якості реєструвальних шарів у носіях з одноразовим і багаторазовим записом, також можуть змінювати свої оптичні властивості під впливом зовнішнього опромінення. Для аналізу впливу світлового опромінення на стан оптичних носіїв використовують метало-галогенні лампи, спектр випромінювання яких є близьким до спектра соняч-

ного світла, тобто максимальна інтенсивність спостерігається при 500 нм, і частково захоплює ультрафіолетову область.

Висновки

У більшості випадків факт виходу оптичного носія з ладу виявляється користувачем коли відтворити з носія записану інформацію вже неможливо, тобто в той момент, для якого рівень некорегованих помилок досяг свого максимально допустимого значення. Хоча, на перший погляд, виникнення некорегованих помилок носить випадковий характер, тим не менш, їхню появу можна спрогнозувати. Аналіз рівня помилок у сигналі відтворення компакт-диска (рис. 7) показує, що некореговані помилки CU з'являються при суттєвому збільшенні рівня корегованих помилок другого рівня C2, які, у свою чергу, з'являються при наблизенні корегованих помилок першого рівня C1 до свого максимально допустимого значення 220 помилок за секунду.

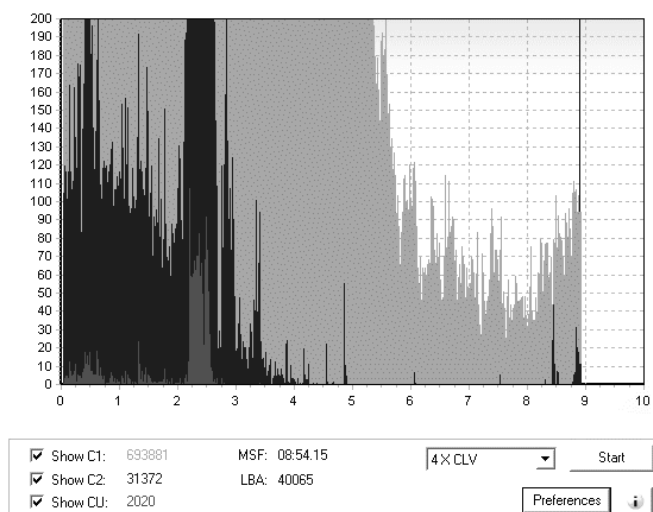


Рис. 7. Рівень помилок у сигналі відтворення компакт-диска

Таким чином, для визначення терміну зберігання інформації на оптичних носіях при виконанні їхнього штучного прискореного старіння в екстремальних умовах необхідно слідкувати за рівнем помилок (C1/C2 для дисків CD та PIE/POE для дисків DVD) і рівнем джитера, збільшення якого також супроводжується збільшенням помилок. У такому випадку використання моделі Ейрінга дозволяє спрогнозувати не тільки момент виходу носія з ладу при зберіганні його в звичайних умовах, але й момент появи корегованих помилок другого рівня, що може бути використано в майбутньому для уточнення моменту виходу носія з ладу й своєчасного резервного копіювання інформації.

1. *Basil Manns and Chandru J. Shahani*. Longevity of CD Media / Research at the Library of Congress. — Washington DC. — 2003. — 14 p.

2. *Slattery O., Lu R., Zheng J., Byers F., Tang X.* Stability Comparison of Recordable Optical Discs — a Study of Error Rates in Harsh Conditions // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology.* — 2004. — Vol. 109, N 5. — P. 517–524.
3. ISO 18921:2002. Imaging Materials — Compact Discs (CD-ROM) — Method for Estimating the Life Expectancy Based on the Effects of Temperature and Relative Humidity. — 1-st ed. — 2002. — 21 p.
4. *Byers F.* Optical Discs for Archiving // National Institute of Standards and Technology, 2004. — Режим доступу: <http://www.itl.nist.gov/div895/gipwog/StabilityStudy.pdf>
5. *Okino Y., Irie M., Kubo T., Okuda M.* Estimating a Life Expectancy of Highdensity Recordable Optical Discs // *Proc. SPTE.* — 2005. — Vol. 5966. — P. 5966 17-1–5966 17-4.
6. *Левин Б.Р.* Справочник по надежности / Пер. с англ. W. Grant Ireson. — М.: Мир, 1969. — Т. 1. — 340 с.
7. *Okino Y., Irie M., Kubo T.* A New Approach for Estimating the Life Expectancy of Optical Disk for Dogotal Archival Storage // *Jap. J. Appl. Phys.* — 2005. — Vol. 44, N 5B. — P. 3513–3515.
8. Optical Media Longevity Study // National Institute of Standards and Technology, 2005. — Режим доступу: <http://www.itl.nist.gov/div895/gipwog/Public%20SP%20500-263%20November%202005.pdf>

Надійшла до редакції 16.01.2008