

**Алоев В. З., Жирикова З.М., Тарчокова М.А.**  
**Aloev V. Z., Zhirikova Z. M., Tarchokova M.A.**

**ЭМПИРИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**  
**EMPIRICAL METHOD OF PREDICTION OF OPERATIONAL PROPERTIES OF POLYMERIC MATERIALS**

Основной проблемой в процессе эксплуатации конструкции из полимерных материалов является обеспечение гарантированной стабильности их физико-механических свойств в течение длительных сроков эксплуатации. В связи с этим проблемы долгосрочного прогнозирования эксплуатационных свойств полимерных материалов, подверженных длительному действию различных факторов (повышенная температура, механическая нагрузка, электрическое поле, радиация, агрессивная среда и т.д.) выходят на первый план. Задача прогнозирования состоит в предсказании изменений свойств материала во времени.

Прогнозирование предусматривает экстраполяцию результатов лабораторного испытания материала при некоторых определенных условиях на другие, о поведении его в которых нет данных. Задачи прогноза обычно решаются эмпирическими, полуэмпирическими и неэмпирическими методами. Эмпирическое прогнозирование проводится по результатам многофакторных испытаний образцов полимерных материалов. В его основе лежат методы математической статистики, факторный анализ и теория планирования эксперимента.

В настоящей работе подробно рассмотрен метод эмпирического прогнозирования. Эмпирическое прогнозирование включает следующие основные этапы.

1. Исследование условий эксплуатации материала, наиболее существенно влияющих на изменение его практически важных свойств. Обычно, из множества факторов выбирают солнечную радиацию, влажность, агрессивные среды, внутренние и внешние напряжения в материале, температуру.

2. Составление математического описания кинетики изменения свойств материала, которое производится с учетом данных предварительных испытаний и сведений о процессе.

3. Экстраполяция на условия эксплуатации и оценка точности прогноза.

В работе в качестве примера рассмотрена методика расчета долговечности полиэтиленовой пленки, использующейся в качестве соленапроницаемых экранов.

В заключении, можно отметить, что реальное прогнозирование всегда является полуэмпирическим и содержит в себе элементы и эмпирического, и неэмпирического прогнозирования.

The main problem in use of a design from polymeric materials is the ensuring the guaranteed stability of their physicomachanical properties during the long terms of operation. In this regard problems of long-term prediction of operational properties of the polymeric materials subject to the long action of various factors (elevated temperature, mechanical loading, an electric field, radiation, a severe atmosphere etc) come to the forefront. The problem of prediction consists in prediction of changes of properties of material in time.

Prediction provides extrapolation of results of laboratory test of material under some particular conditions on others, about behavior it in which there are no data. Problems of the forecast are usually solved empirical, semi empirical and not - empirical methods. Empirical prediction is carried out by results of multifactorial test of exemplars of polymeric materials. Methods of mathematical statistics, a component analysis and the theory of scheduling of an experiment are its cornerstone.

In the real work the method of empirical prediction explicitly is considered. Empirical prediction includes the following main stages.

1. A research of the external environment of material which is most significantly influencing change of its almost important properties. Usually it is chosen a sunshine, humidity, severe atmospheres, internal and external stresses in material from a set of factors, temperature.

2. Drawing up the kinetics mathematical description of material properties change which is made taking into account these trial tests and data on process.

3. Extrapolation on an external environment and assessment of accuracy of the forecast.

In work as an example the method of calculation of longevity of the polyethylene film is considered which is used as the sun-permeable screens.

In conclusion it is possible to note that real prediction always is semi empirical and comprises elements and empirical and not empirical prediction.

**Ключевые слова:** прогнозирование, работоспособность, старение, метод наименьших квадратов, эксплуатационные свойства, долговечность, термодеструкция, структурирование.

**Key words:** prediction, serviceability, aging, method of least squares, operational properties, longevity, thermal degradation, structuring

**Алоев Владимир Закиевич** – доктор химических наук, профессор кафедры технической механики и физики, ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, г. Нальчик.

**Жирикова Заира Муссавна** – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры технической механики и физики, ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, г. Нальчик.

**Тарчокова Муминат Адиповна** – доцент кафедры технической механики и физики, ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, г. Нальчик.

**Aloev Vladimir Zakievich** – Doctor of Chemical Sciences, professor in the chair of Technical mechanics and physics, FSBEI HE Kabardino-Balkarian SAU, Nalchik.

**Zhirikova Zaira Mussavna** – Candidate of physic-mathematical sciences senior teacher in the chair of Technical mechanics and physics, FSBEI HE Kabardino-Balkarian SAU, Nalchik.

**Tarchokova Muminat Adibovna** – Associate Professor, Department of Technical Mechanics and Physics, FSBEI HE Kabardino-Balkarian SAU, Nalchik.

**Введение.** В процессе эксплуатации элементы конструкции из полимерных материалов подвергаются длительному воздействию различных внешних факторов (повышенная температура, механическая нагрузка, электрическое поле, радиация, агрессивная среда и т.д.). В результате таких воздействия первоначальные свойства материалов со временем могут значительно изменяться.

В связи с этим на первый план выходят проблемы долгосрочного прогнозирования эксплуатационных свойств полимерных материалов.

**Методология проведения работы.** Задача прогнозирования состоит в предсказании изменений свойств материала во времени. Прогнозирование предусматривает экстраполяцию результатов лабораторного испытания материала при некоторых определенных условиях на другие, о поведении его, в которых нет данных [1,2]. Задачи прогноза обычно решаются эмпирическими, полуэмпирическими и неэмпирическими методами [3,4].

Эмпирическое прогнозирование проводится по результатам многофакторных испытаний образцов полимерных материалов. В его основе лежат методы математической статистики, факторный анализ и теория планирования эксперимента [5].

На практике необходимо учитывать все три элемента прогнозирования в зависимости от условий исследования.

В настоящей работе рассмотрим подробно метод эмпирического прогнозирования [6].

Эмпирическое прогнозирование включает следующие основные этапы:

1. Исследование условий эксплуатации материала, наиболее существенно влияющих на изменение его практически важных свойств. Обычно, из множества факторов  $\{x_i\}$  выбирают солнечную радиацию, влажность, агрессивные среды, внутренние и внешние напряжения в материале, температуру.

2. Составление математического описания кинетики изменения свойств материала, которое производится с учетом данных предварительных испытаний и сведений о процессе. Например, если известно, что количественная характеристика какого-либо свойства может только монотонно убывать, никогда не достигая отрицательных значений, то есть все основания выбрать математическое описание из класса функции, для которого при любых условиях эксплуатации  $\{x_i\}$  и времени  $t$  справедливо

$$\frac{dF}{dt} < 0, \text{ а } F > 0. \quad (1)$$

Такому условию удовлетворяет сумма экспонент

$$F = \sum_m \alpha_m e^{-\beta_m t}, \text{ (где } \alpha_m, \beta_m > 0) \quad (2)$$

или класс функции

$$F = \frac{F_0}{\sum_n \gamma_n t^n}, \text{ (где } \gamma_n > 0). \quad (3)$$

В выбранном математическом описании, например, методом наименьших квадратов, отыскиваются неизвестные коэффициенты, наилучшим образом удовлетворяющие имеющиеся экспериментальные данные.

3. Экстраполяция на условия эксплуатации и оценка точности прогноза. Примеры эмпирического прогнозирования многочисленны. Так, срок работоспособности электроизоляционных материалов прогнозируют с помощью эмпирического уравнения [7]:

$$\tau = cE^{-m}, \quad (4)$$

где  $E$  – напряженность (потенциал) электрического поля, а эмпирические параметры  $c$  и  $m$  определяются из зависимости  $\tau(E)$  в условиях испытаний.

Разрушение материалов в условиях действия агрессивных сред описывается обычно эмпирическими уравнениями типа [8]

$$Y = be^{-\alpha t}, \quad (5)$$

в которых константы  $\alpha$  и  $b$  находят эмпирически в условиях испытаний [8]. Долговечность определяется как время  $\tau$ , при котором значение  $Y$  становится критическим.

В работе [9] предложена методика расчета долговечности полимерных пленок. Исследовалась полиэтиленовая пленка (ПЭ), используемая в качестве солонепроницаемых экранов. Установлено, что при их эксплуатации протекают два конкурирующих процесса: термодеструкция и структурирование. Первый этап старения характеризуется упорядочением структуры, ростом степени кристалличности материала, а также плотности. С течением времени начинают преобладать процессы деструкции, приводящие к уменьшению сплошности материала и увеличению его жесткости.

Процесс старения характеризуется уменьшением относительного удлинения пленки при разрыве ( $\varepsilon$ ) с течением времени. Так, при  $\varepsilon = 17\%$  пленка не пригодна в эксплуатации, так как ее коэффициент проницаемости возрастает до  $10^{-3}$  и наблюдается фильтрация электролита. Время, при котором  $\varepsilon = \varepsilon_{кр} = 17\%$ , составляет долговечность пленки – экрана.

Зависимость  $\varepsilon$  от времени  $t$  может быть представлена в виде.

$$\varepsilon = A - Be^{\alpha t}, \quad (6)$$

$$A = \varepsilon_{\max} + 1, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_{\max}$  – максимальное значение  $\varepsilon$ , полученное за весь период испытания;  
 $t$  – время старения, сут.

Сделав замену переменных, преобразуем уравнение (6) в линейную зависимость

$$\varepsilon^* = \lg(A - \varepsilon), \quad (8)$$

получим

$$\varepsilon^* = \lg(A - \varepsilon) = \lg(Be^{\alpha t})$$

или

$$\varepsilon^* = a + b(t - \bar{t}). \quad (9)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты, подлежащие определению;  $\bar{t}$  – среднее значение исследованного промежутка времени (1010,7 сут) [10,11].

Тогда зависимость  $\varepsilon$  от времени будет выражаться функцией

$$\varepsilon(t) = A - 10^{\varepsilon^*(t)} = A - 10^{a - b\bar{t} + bt} \quad (10)$$

т.е.  $B = 10^{a - b\bar{t}}$ ;  $\alpha = b \ln 10$ .

Прямая (9), согласно методу наименьших квадратов, проводится таким образом, чтобы обеспечить минимальный разброс экспериментальных данных около нее.

Для коэффициентов регрессии получают выражение:

$$a = \bar{\varepsilon}^*; \quad (11)$$

$$\hat{b} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n t_j t_{ij}^* - \bar{t} \bar{\varepsilon}^*}{s_t^2}, \quad (12)$$

где:  $k$  – количество отрезков времени, в которых проводились испытания;  $n$  – количество параллельных испытаний;  $N$  – общее число испытаний ( $N = nk$ );  $\bar{\varepsilon}^*$  – общее среднее значение  $\varepsilon_{ij}^*$ ;  $s_t^2$  – дисперсия величины  $t_j$ .

По формулам (11) и (12) с использованием преобразованных данных были получены значения коэффициентов  $a = 2,4439$ ;  $\hat{c} = 0,00037$ .

Уравнение эмпирической линии регрессии (9) принимает вид:

$$\varepsilon^* = 2,4439 + 0,00037(t - 1010,71). \quad (13)$$

При переходе к исходным значениям полученная зависимость  $\varepsilon$  от времени будет описываться уравнением:

$$\bar{\varepsilon} = 631,0 - 109,6 \cdot 10^{0,00037t}. \quad (14)$$

Проведенная проверка по  $F$ - критерию [10] показала, что преобразованные экспериментальные данные хорошо описываются линейной зависимостью (13). Расчет доверительных интервалов для  $\varepsilon$ ,  $a$  и  $b$  проводился по  $t$  – критерию [10].

Отклонения значений  $\varepsilon$  для отдельных пленок от регрессионной прямой определялись по уравнению [11]:

$$\varepsilon_{1,2}^* = \varepsilon^* \pm t_{0,025}(N-2)s \left[ 1 + N^{-1} \left( 1 + \frac{(t - \bar{t})^2}{s_t^2} \right) \right]^{1/2}, \quad (15)$$

где  $s$  – дисперсия отклонений преобразованных экспериментальных данных от линии регрессии (13).

С доверительной вероятностью 0,95 значение  $\varepsilon^*$  после заданного срока эксплуатации  $t$ , будут находиться в пределах

$$\varepsilon_1^* \leq \varepsilon^* \leq \varepsilon_2^* \quad (16)$$

Соответствующая область возможных значений  $\varepsilon^*$  для отдельных пленок (ПЭ) показана на рисунке 1 сплошными линиями.

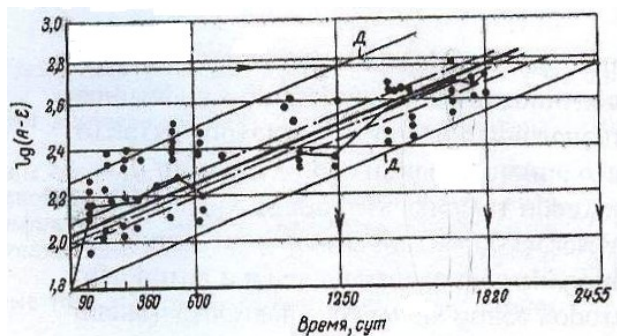


Рис. 1 Зависимость относительного удлинения при разрыве ( $\varepsilon$ ) ПЭ пленки от времени (по данным работы [9]) (время – в сутках;  $\varepsilon$  – в %; -----границы 95%-ного

доверительного интервала для средних значений  $\varepsilon$ ; Д – границы 95%-ного доверительного интервала значений  $\varepsilon$  отдельных образцов)

Статистическая обработка данных подтверждает экспоненциальный характер старения полиэтиленовых пленок и позволяет получить параметры этой зависимости. Предельному удлинению (17%) соответствует в преобразованных данных величина 2,788. Проводя на графике зависимости  $\lg(A - \varepsilon)$  от времени  $t$  (рис. 1) прямую  $\varepsilon^*_{\text{пред}} = 2,788$ , находим среднее время эксплуатации пленок  $t_{\text{ср}} = 1820$  сут. и доверительный интервал для  $t_{\text{ср}}$ :

$$1790 \leq t_{\text{ср}} \leq 1850 \text{ (сут)}. \quad (17)$$

Так как в ряде случаев образцы могут иметь значения относительного удлинения при разрыве, отличные от рассчитанных (в пределах области, выделенной на рисунке 1 сплошными линиями), пересечение линии  $\varepsilon^*_{\text{пред}} = 2,788$  с границами этой области позволит найти пределы времени, в которых возможно разрушение пленки. Таким образом, минимальная долговечность исследуемой пленки составляет 1250, а максимальная – 2455 суток.

**Результаты исследования.** Результаты проведенного анализа полиэтиленовой пленки позволяют сделать вывод о том, что определяемые в ходе эмпирического прогнозирования срок службы может быть связан с конкретным видом и даже маркой полимерного материала. Однако в случае натуральных испытаний они наиболее полно учитывают воздействие природных и эксплуатационных факторов. На практике необходимо учитывать все три элемента прогнозирования в зависимости от условий исследования.

**Область применения результатов.** Сельскохозяйственное машиностроение, материаловедение, физика, химия.

**Выводы.** Обобщая изложенные выше результаты можно отметить, что реальное прогнозирование всегда является полуэмпирическим и содержит в себе элементы эмпирического и неэмпирического прогнозирования.

## Литература

1. Карпухин О.Н. Определение срока службы полимерного материала как физико-химическая проблема // Успехи химии. 1960. Т. XLIX, № 8; С. 1523-1552.
2. Прогнозирование изменения свойств полимерных материалов при длительном хранении и эксплуатации // Успехи химии. 1960. Т. XLIX, № 8; С.1554-1573.
3. Варбанская Р.А., Генкина Л.К., Ясина Л.Л., Штукарева В.Б., Пудов В.С. Метод прогнозирования срока службы полимерных изделий.// Высокомолекулярные соединения. Сер. Б. 1979. Т. 21, № 10. С. 748-751.
4. Эмануэль Н.М., Бучаченко А.Л. Химическая физика старения и стабилизации полимеров. – М.: Наука, 1982.-359с.
5. Круг Г.К., Сосулин Ю.А., Фадеев В.А. Планирование эксперимента в задачах идентификации и экстраполяции. М.: Наука, 1973. 230с.
6. Алоев В.З., Кейдия Г.Ш., Цыганов А.Д., Зеленев Ю.В. Прогнозирование эксплуатационных свойств композиционных полимерных материалов с учетом их теплового старения. Обзорная информация. Серия «Противокоррозионная защита». М.:НИИТЭХИМ, 1992.-70с.
7. Койков С.Н., Цикин А.Н. Электрическое старение твердых диэлектриков. М.: Энергия, 1969. 186с.
8. Жердев Ю.В., Панфилов В.Н.//Пластмассы. 1978. №2. С. 31-32.
9. Межов А.Е., Сониная Н.М., Штерн Л.М. Методика расчета долговечности полимерных пленок.//Пластмассы. 1977. №6. С.25,26.
10. Айвазян С.А. Статистическое исследование зависимостей. М., «Металлургия», 1968. 227 с.
11. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями. М., ИЛ, 1956. 767 с.

### References

1. Karpukhin O.N. Opredeleniye sroka sluzhby polimernogo materiala kak fizi-ko-khimicheskaya problema //Uspekhi khimii. 1960. T. XLIX, № 8; S. 1523-1552.



2. Prognozirovaniye izmeneniya svoystv polimernykh materialov pri dlitelnom khraneni i ekspluatatsii //Uspekhi khimii. 1960. T. XLIX, № 8; S.1554-1573.

3. Varbanskaya R.A., Genkina L.K., Yasina L.L., Shtukareva V.B., Pudov V.S. Metod prognozirovaniya sroka sluzhby polimernykh izdely.// Vysokomolekulyarnye soyedineniya. Ser. B. 1979. T. 21, № 10. S. 748-751.

4. Emanuel N.M., Buchachenko A.L. Khimicheskaya fizika stareniya i stabilizatsii polimerov. – M.: Nauka, 1982.-359s.

5. Krug G.K., Sosulin Yu.A., Fadeyev V.A. Planirovaniye eksperimenta v zadachakh identifikatsii i ekstrapolyatsii. M.: Nauka, 1973. 230s.

6. Aloyev V.Z., Keydiya G.Sh., Tsyganov A.D., Zelenev Yu.V. Prognozirovaniye ekspluatatsionnykh svoystv kompozitsionnykh polimernykh materialov s uchetom ikh teplovogo stareniya. Obzornaya informatsiya. Seriya «Protivokorroziyonnaya zashchita». M.:NIITEKhim, 1992.-70s.

7. Koykov S.N., Tsikin A.N. Elektricheskoye starenie tverdykh dielektrikov. M.: Energiya, 1969. 186s.

8. Zherdev Yu.V., Panfilov V.N.//Plastmassy. 1978. №2. S. 31-32.

9. Mezhev A.E., Sonina N.M., Shtern L.M. Metodika rascheta dolgovechnosti polimernykh plenok.//Plastmassy. 1977. №6. S.25,26.

10. Ayvazyan S.A. Statisticheskoye issledovaniye zavisimostey. M., «Metal-lurgiya», 1968. 227 s.

11. Khald A. Matematicheskaya statistika s tekhnicheskimi prilozheniyami. M., IL, 1956. 767 s.