

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКОВ СОХРАНЯЕМОСТИ ИЗДЕЛИЙ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЯМОГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

И.С. Мальцев, Ю.Т. Одинцов

FORECASTING THE STORAGEABILITY TIME PRODUCTS UNDER THE INFLUENCE OF DIRECT SOLAR RADIATION

I. Maltsev, Yu. Odintsov

Для прогноза сроков сохраняемости изделий из полимерных материалов, эксплуатируемых в условиях воздействия солнечной радиации, предложен подход для определения эквивалентных температур на основе математического моделирования теплового состояния изделий во времени. Изложена процедура задания граничных условий, учитывающая суточный и годовой ход солнца относительно изделия, суточный и годовой ход температуры окружающей среды.

Ключевые слова: эквивалентная температура, старение полимерного материал, поглощение солнечной радиации, тепловое состояние.

The paper describes the approach to determining equivalent temperatures on the basis of mathematical modeling for the thermal state of polymer articles in time for the purpose of forecasting the storageability time of polymer articles operated under the influence of solar radiation. The procedure of specifying boundary conditions is stated. This procedure considers the daily and annual sun motion relative to the article, the daily and annual fluctuations of ambient temperature.

Keywords: equivalent temperature, polymer material ageing, absorption of solar radiation, thermal state.

В настоящее время на открытом воздухе в наземных условиях эксплуатируется большинство изделий. Эксплуатация изделий на открытом воздухе ставит их в условия неблагоприятного воздействия климатических факторов (температуры и влажности воздуха, солнечной радиации и т. п.). В результате этого воздействия ухудшаются свойства конструкционных материалов изделий и снижаются сроки их служебной пригодности.

Особый интерес представляет изучение влияния повышенных температур и солнечного излучения на тепловое состояние изделий, содержащих узлы и элементы из полимерных материалов, эксплуатируемых в странах с тропическим климатом. Тепловое состояние изделий может оказывать значительное влияние на срок сохраняемости изделий. В предлагаемой работе задача решается численным моделированием с использованием метода конечных элементов.

Математическая постановка задачи в дифференциальной форме описывается уравнением нестационарной теплопроводности в полярной системе координат:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right), \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость; ρ – плотность; τ – время; λ – коэффициент теплопроводности; r – радиус; φ – угол.

Уравнение (1) дополняется начальным условием

$$T(r, \varphi, 0) = T_0 \quad (2)$$

Расчет и конструирование

и граничным условием 2-го рода

$$q_{\Sigma} = f(R, \varphi, \tau) \text{ на поверхности } S_2, \quad (3)$$

или граничным условием 3-го рода

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha (T - T_c) \text{ на поверхности } S_3 \quad (4)$$

на наружной поверхности изделия, T_0, R – начальная температура и наружный радиус изделия; α – коэффициент теплоотдачи; T_c – температура окружающей среды.

Приближенное решение уравнения (1) с начальным (2) и граничными (3) и (4) условиями приводится к вариационной постановке задачи о нахождении минимума функционала J [1]:

$$\delta J(T(r, \varphi, \tau)) = 0,$$

где δ – символ вариации, J – функционал, то есть функция, зависящая от значений другой функции.

Для плоской задачи нестационарной теплопроводности, то есть для поперечного сечения изделия, функционал J представляется в виде:

$$J = \int_v \{0,5[\lambda(\partial T / \partial r)^2 + \lambda(\partial T / \partial \varphi)^2] - (Q - \rho c(\partial T / \partial \tau)T)\} dV + \int_{S_2} q_{\Sigma} dS + \int_{S_3} (\alpha T^2 / 2 - \alpha T T_c) dS.$$

Реализация вариационной постановки задачи методом конечных элементов приводит к получению разрешающего дифференциально-матричного уравнения в форме

$$[C] \frac{\partial \{\bar{T}\}}{\partial \tau} + [K] \cdot \{\bar{T}\} = \{\bar{F}\}, \quad (5)$$

где $[C], [K]$ и $\{\bar{F}\}$ – глобальные матрицы теплоемкости, теплопроводности, вектор тепловых нагрузок и $\{\bar{T}\}$ – вектор узловых температур.

Для получения решения уравнения (5) пошаговым методом его необходимо привести к матрично-алгебраическому виду. С этой целью воспользуемся его конечно-разностной аппроксимацией по времени. Запишем уравнение (5) в виде

$$[C]_k \cdot \frac{\partial \{\bar{T}\}_k}{\partial \tau} + [K]_k \cdot \{\bar{T}\}_k = \{\bar{F}\}_k, \quad (6)$$

здесь параметры с индексом «к» соответствуют времени $\tau_k = \tau_0 + \sum_{i=1}^k \Delta \tau_i$,

где τ_0 – начало отсчета времени, в частности $\tau_0 = 0$.

С использованием левосторонней разности $\frac{\partial \{\bar{T}\}_k}{\partial \tau} \approx \frac{\{\bar{T}\}_k - \{\bar{T}\}_{k-1}}{\Delta \tau}$ уравнение (6) принимает вид

$$\left(\frac{1}{\Delta \tau_k} [C]_k + [K]_k \right) \{\bar{T}\}_k = \frac{1}{\Delta \tau_k} [C]_k \{\bar{T}\}_{k-1} + \{\bar{F}\}_k. \quad (7)$$

Полученное выражение (7) представляет собой разрешающее матрично-алгебраическое уравнение для определения неизвестных температур в узловых точках дискретной схемы изделия в конце каждого временного шага $\Delta \tau$ и непосредственно используется для составления вычислительной программы.

Рассмотрено решение задачи при граничных условиях 2-го рода с учетом суточного и годового движения Солнца. Полагаем, что на каждый элемент поверхности изделия падает тепловой поток

$$q_{\Sigma} = q_p + q_k + q_l + q_3,$$

где q_p, q_k, q_l и q_3 – радиационная, конвективная, лучистая и отраженная от поверхности земли составляющие теплового потока.

Для расчета q_p использовано соотношение

$$q_p = I_s \cdot \beta_c \cdot D_a \cdot \cos \theta, \quad (8)$$

где I_s – солнечная постоянная, равная $4,873 \cdot 10^6$ кДж/(м²·ч) [2]; D_a – коэффициент прозрачности атмосферы, принимаем $D_a = 0,82$ [3]; θ – угол между направлением солнечных лучей и нормалью к поверхности элемента; β_c – коэффициент поглощения поверхностью изделия.

Для определения $\cos \theta$ используется формула из работы [2]

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos S - \sin \delta \cos \varphi \sin S \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos S \cos w + \cos \delta \sin \varphi \sin S \cos \gamma \cos w + \cos \delta \sin S \sin \gamma \sin w. \quad (9)$$

Обозначение углов $\delta, \varphi, S, \gamma, w$ приведены в работе [2].

Выражения (8) и (9) позволяют рассчитывать приход солнечной энергии на каждый элемент поверхности изделия в любое время конкретных суток года для конкретной местности.

Конвективная составляющая q_k определяется по закону Ньютона

$$q_k = \alpha(T_c - T_0),$$

где α – коэффициент теплоотдачи.

Для определения коэффициента α использованы критериальные зависимости для поперечного обтекания воздушным потоком одиночной горизонтальной трубы из работы [4].

Лучистая составляющая теплового потока определяется теплообменом между наружной поверхностью изделия и небосводом [2]:

$$q_l = \beta_c \cdot \sigma \cdot (T_{эф}^4 - T_0^4),$$

где β_c – коэффициент поглощения поверхностью изделия; σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,668 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); $T_{эф}$ – эффективная температура небосвода, определяемая выражением

$$T_{эф} = 0,0552 \cdot T_c^{1,5}.$$

Составляющая, определяющая поток от земной поверхности к элементу поверхности расчетного сечения изделия, имеет вид [2]

$$q_3 = \beta_c \rho_3 q_{pz} (1 - \cos S) / 2,$$

где ρ_3 – диффузная отражательная способность земной поверхности по отношению к солнечному излучению, в расчетах принято $\rho_3 = 0,2$ [2]; q_{pz} – составляющая потока солнечной радиации, падающая на горизонтальную поверхность

$$q_{pz} = I_s \cdot D_a \cos \theta_z,$$

где $\cos \theta_z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos w$.

Состав изделия, принятого к расчету, геометрические размеры и теплофизические характеристики составляющих элементов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Состав, геометрические размеры и теплофизические характеристики

Номер элемента	Конструкционный элемент	Радиус, мм	λ , Вт/(м·К)	C , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³
1	Полимерный блок	20/60	0,2326	1255	1500
2	Теплозащитное покрытие	60/65	0,2907	1255	1200
3	Воздушный зазор	65/70	0,0267	1004	1,25
4	Теплозащитное покрытие	70/75	0,2326	1255	1200
5	Стальной корпус	75/78	34,89	502	7800
6	Воздушный зазор	78/83	0,0267	1004	1,25
7	Корпус контейнера	83/88	0,0174	1255	1800

Для численного решения задачи поперечное сечение изделия представлялось в виде конечной элементной сетки в полярной системе координат $r - \varphi$ с числом узлов $NU = 555$, числом конечных элементов $NE = 1008$, с шириной полуполосы ленточной термической матрицы системы

Расчет и конструирование

$SH = 17$. При этом в направлении радиуса r выбрано 15 точек деления (узлов) с неравномерным шагом Δr , а в направлении угла φ 37 – точек деления (узлов) с равномерным шагом $\Delta\varphi = 10^\circ$ от 0 до 360° (то есть $NU = 15 \times 37 = 555$). Для автоматической дискретизации поперечного сечения изделия использовались плоские треугольные конечные элементы.

Расчеты проведены для региона с сухим тропическим климатом [5, с. 7–9]. Выбор обусловлен несколькими причинами: во-первых, в этом регионе высока энергетическая экспозиция солнечного излучения, во-вторых, для этого региона имеются необходимые для проведения расчета статистические данные многолетних наблюдений температуры окружающей среды.

Поскольку в стандарте [5] статистическая информация о температуре окружающей среды представлена в виде среднемесячных температур и среднесуточных перепадов, потребовался прием перехода от среднемесячных значений температур среды ($T_{с.м}$) к текущим (T_i). В расчетах для этих целей использовано выражение

$$T_i = T_{с.м} - \Delta T / 2 \sin(\pi / 2 + \tau_y), \quad (10)$$

где ΔT – среднемесячный суточный перепад (ход) температуры; τ_y – угловое время суточного движения (хода) температуры.

Алгоритм расчета углового времени τ_y таков, чтобы для каждого суток обеспечивалось выполнение двух условий: на восходе солнца температура окружающего воздуха минимальна, а в 14 ч 30 мин местного солнечного времени она достигает суточного максимума.

В табл. 2 с использованием исходных данных по ГОСТ 24482-80 представлен рассчитанный по изложенному алгоритму суточный ход температуры для региона с сухим тропическим климатом на 1 августа. При этом время восхода солнца выбирается согласно работе [2].

Таблица 2

Зависимость температуры воздуха T_i от времени суток τ_y

τ_y , ч	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_i , °C	30,1	28,9	27,9	27,0	26,4	26,1	26,0	26,9	28,9	31,6	34,6	37,4
τ_y , ч	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T_i , °C	39,6	40,8	41,0	40,7	40,2	39,4	38,4	37,3	35,9	34,5	33,1	31,5

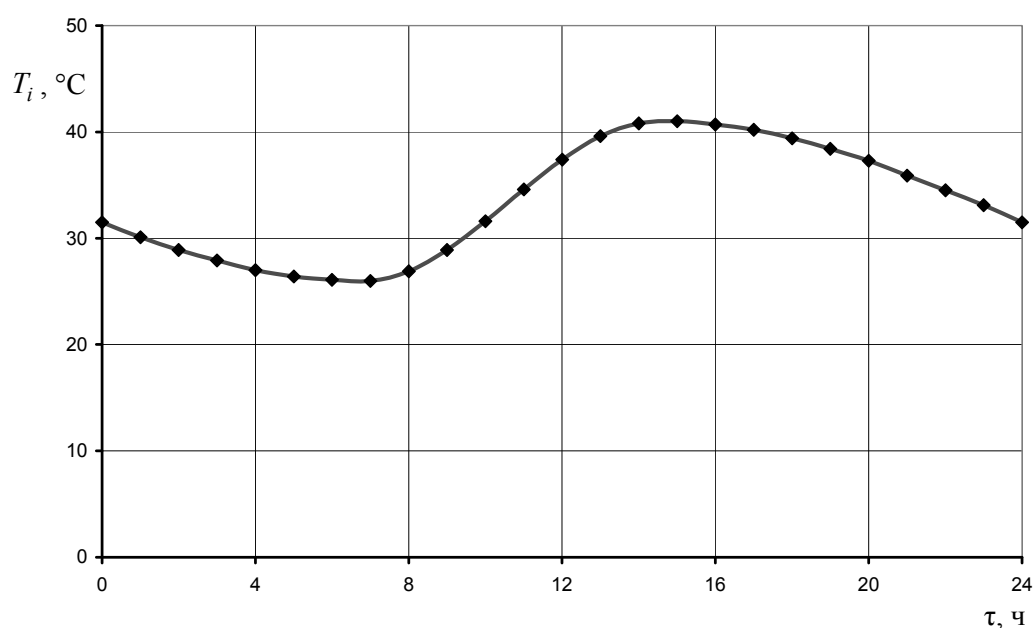


Рис. 1. Зависимость температуры воздуха от времени суток

По изложенному алгоритму рассчитывается распределение температур в изделии за характерный промежуток времени эксплуатации (обычно за один год).

Для прогноза и обоснования сроков сохраняемости изделий из полимерных материалов в настоящее время широко используется параметр «эквивалентная температура» ($T_{\text{ЭКВ}}$). Переход от годового распределения температуры (по времени) в какой-то конкретной, выбранной исходя из целей решаемой задачи, зоне изделия к эквивалентной температуре осуществляется согласно ГОСТ [6].

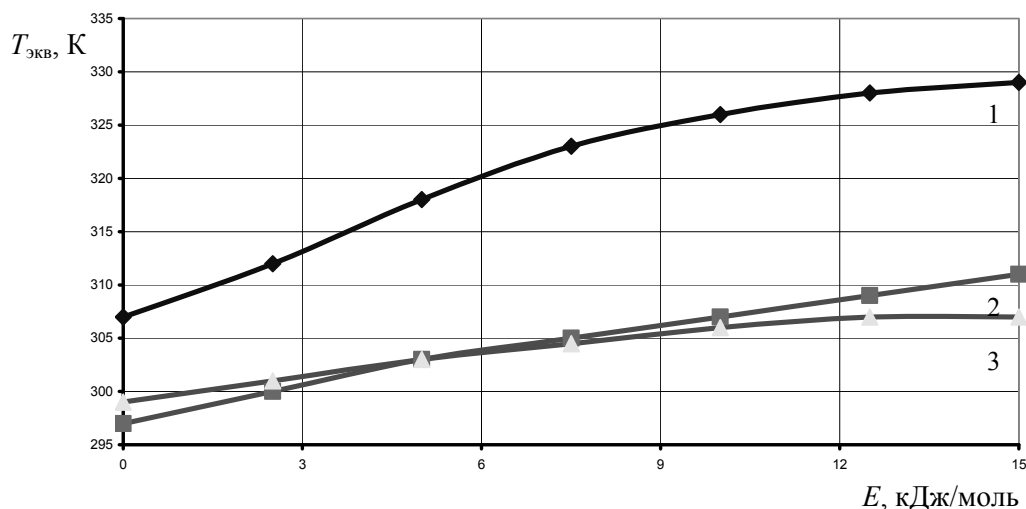


Рис. 2. Расчетные значения $T_{\text{ЭКВ}}$. Изделие вне контейнера: 1 – поверхность изделия темного цвета ($\beta_c = 0,8$); 2 – поверхность изделия светлого цвета ($\beta_c = 0,26$); 3 – изделие под навесом

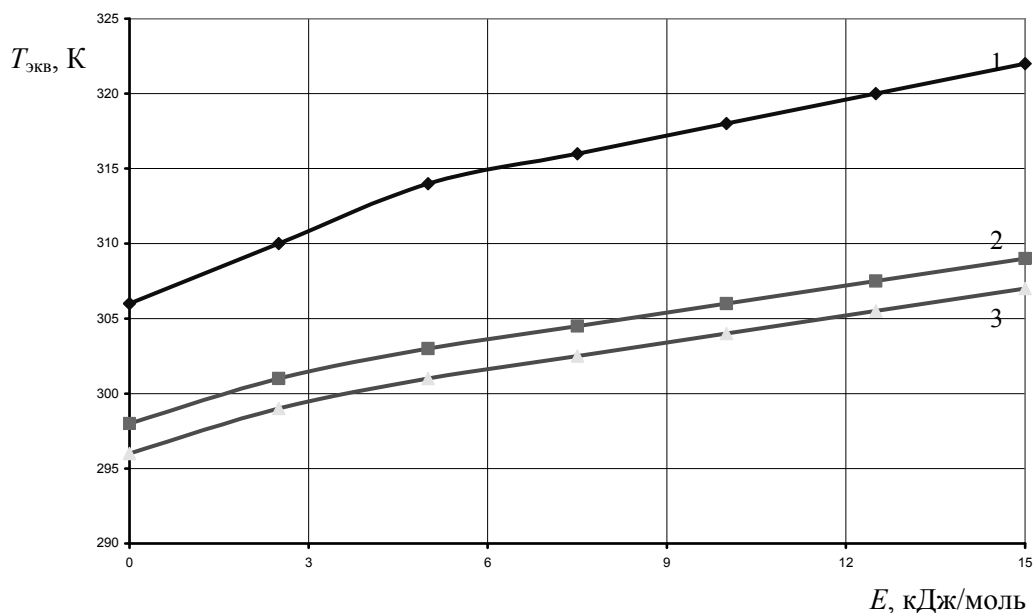


Рис. 3. Расчетные значения $T_{\text{ЭКВ}}$. Изделие в контейнере: 1 – поверхность изделия темного цвета ($\beta_c = 0,8$); 2 – изделие под навесом; 3 – поверхность изделия светлого цвета ($\beta_c = 0,26$)

Результаты расчетов представляются в виде зависимостей эквивалентных температур эксплуатации от температурного коэффициента (E) процесса старения полимерного материала, определяющего срок сохраняемости изделия. На рис. 2–4 приведены результаты расчетов.

На рис. 2 и 3 представлены результаты расчета для центральной зоны ($R = 4$ см) полимерного блока, на рис. 4 – для зоны контакта «полимерный блок – теплозащитное покрытие» ($R = 6$ см).

Расчет и конструирование

Во всех случаях расчеты выполнены для точек, лежащих на радиусе, направленном под углом 45° к горизонту в западном направлении – в этой зоне суточные температуры в элементах изделия максимальны.

Для случая высокой теплозащитности расчетной зоны наличие нескольких теплозащитных слоев и светоотражающей внешней поверхности, рассчитанные с учетом воздействия прямой солнечной радиации значения эквивалентных температур (рис. 2, кривая 2 и рис. 3, кривая 3) близки к таковым, определенным по данным метеонаблюдений. По данным стандарта [5] для условий под навесом: рис. 2, кривая 3, или рис. 3, кривая 2. С увеличением коэффициента поглощения внешней поверхностью вклад солнечной радиации становится весьма значимым (рис. 2, кривая 1 и рис. 3, кривая 1), в этом случае возрастает теплозащитная роль внешнего контейнера.

На рис. 4 представлены результаты расчетов для зоны изделия, расположенной ближе к поверхности и соответственно менее теплозащитной, чем середина полимерного блока. В этом случае вклад солнечной радиации значим даже для изделий с поверхностью, обладающей низким коэффициентом поглощения.

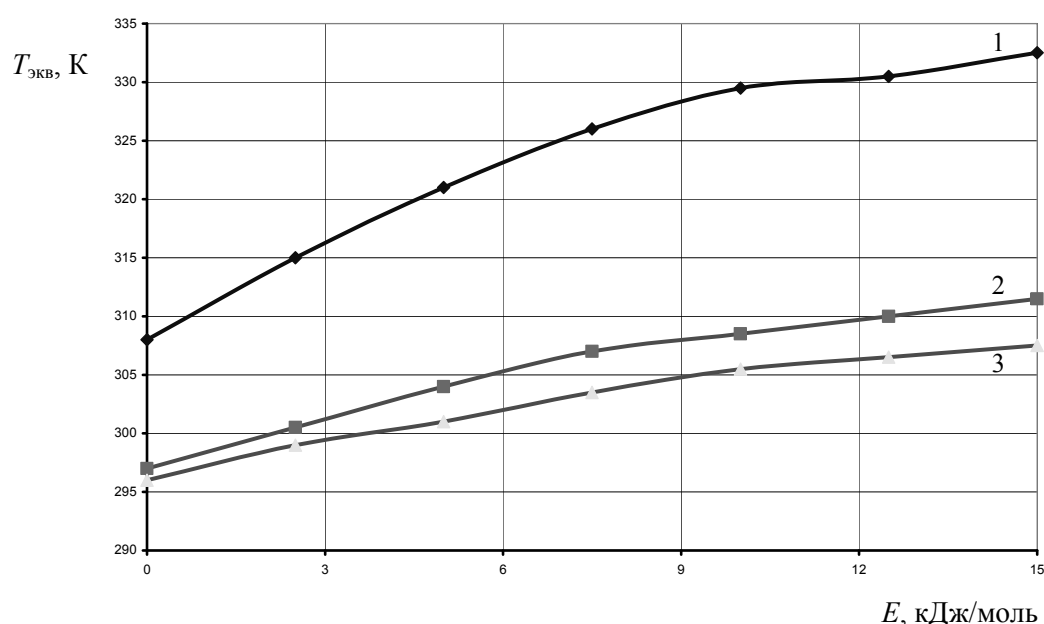


Рис. 4. Расчетные значения $T_{\text{экв}}$. Изделие вне контейнера:
1 – поверхность изделия темного цвета ($\beta_c = 0,8$); 2 – поверхность изделия светлого цвета ($\beta_c = 0,26$); 3 – изделие под навесом

Для экспериментального подтверждения срока сохраняемости изделий, принимая конкретную температуру форсированного старения ($T_{\text{фс}}$), с помощью уравнения Аррениуса

$$\lg \tau_{\text{фс}} = \lg \tau_{\text{экс}} - \frac{E}{4,75} \left(\frac{1}{T_{\text{экв}}} - \frac{1}{T_{\text{фс}}} \right)$$

рассчитывается время старения $\tau_{\text{фс}}$, проводится форсированное старение изделия и последующее его испытание.

Заключение. Разработан и реализован в виде вычислительной программы конечноэлементный метод расчета текущих значений температур и эквивалентных температур эксплуатации изделий с учетом воздействия прямой солнечной радиации с учетом суточного и годового движения Солнца.

Литература

1. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 248 с.
2. Даффи, Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж.А. Даффи, У.А. Бекман. – М.: Мир, 1977. – 420 с.

3. Хоблер, Т. Теплопередача и теплообмен / Т. Хоблер. – Л.: Госхимиздат, 1961. – 820 с.
4. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
5. ГОСТ 24482–80. Макроклиматические районы земного шара с тропическим климатом. Районирование и статистические параметры для технических целей. – 94 с.
6. ГОСТ 9.707–81. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение. – 80 с.

Поступила в редакцию 22 мая 2012 г.

Мальцев Иван Селиверстович. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт полимерных материалов, г. Пермь. Область научных интересов – теория, проектирование и эксплуатация машин. E-mail: niipm@pi.ccl.ru

Ivan S. Maltsev. Candidate of technical sciences, senior scientific worker, Research institute of polymeric materials, Perm. Professional interests – theory, design and usage of machines. E-mail: niipm@pi.ccl.ru

Одинцов Юрий Тимофеевич. Кандидат технических наук, начальник лаборатории, Научно-исследовательский институт полимерных материалов, г. Пермь. Область научных интересов – физико-химическая стабильность изделий материалов. E-mail: niipm@pi.ccl.ru

Jurii T. Odintsov. Candidate of technical sciences, chief of laboratory, Research institute of polymeric materials, Perm. Professional interests – physic-chemical stability of the articles made of polymeric materials. E-mail: niipm@pi.ccl.ru