

DOI: 10.15593/2224-9982/2015.41.09

УДК 662.37:678.019.391

**Г.Н. Амарантов<sup>1, 2</sup>, Е.А. Новоточинова<sup>1</sup>, Ю.Т. Одинцов<sup>1</sup>,  
С.В. Ерышканов<sup>1, 2</sup>, В.М. Зиновьев<sup>1, 2</sup>, Д.С. Гуров<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> АО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов»,  
Пермь, Россия

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

## **ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ, ВЫПОЛНЕННЫЙ ПОСРЕДСТВОМ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНОГО СВЯЗУЮЩЕГО**

Предложен подход к исследованию кинетических закономерностей теплового старения энергетических конденсированных систем (ЭКС) на основе наполненного полидивинилэпоксидуретанового каучука и к прогнозу механических характеристик изделий на их основе по изменению структурных характеристик связующего, определенных методом равновесного набухания образцов в органическом растворителе. Закономерности теплового старения ЭКС установлены в ускоренных экспериментах в диапазоне температур термостатирования 60–80 °С.

За развитием при тепловом старении изучаемых процессов (деструкции и структурирования) следили по изменению механических характеристик, определенных в результате одноосного растяжения стандартных образцов в виде лопаточек и по изменению структурных характеристик полимерного связующего (а именно: молекулярной массе участка цепи, заключенного между поперечными связями, и плотности поперечных связей), установленных по величинам предела набухания согласно уравнению Флори – Ренера.

Обработка экспериментальных данных выполнена с помощью кинетического уравнения первого порядка, температурная зависимость констант скоростей изучаемых процессов установлена в виде зависимости Аррениуса. При этом показана удовлетворительная корреляция изменений при старении механических и структурных характеристик полимерного связующего.

Предложена и апробирована методика изучения закономерностей деструктивных процессов, развивающихся при старении ЭКС, необходимых для прогноза механического состояния изделий при их эксплуатации в теплонпряженных климатических условиях.

Подтверждена возможность выполнения прогнозов механического состояния ЭКС при эксплуатации изделий на их основе с использованием кинетических закономерностей, установленных по изменению плотности поперечных связей связующего.

**Ключевые слова:** энергетические конденсированные системы (ЭКС), ускоренное тепловое старение, деструкция, структурирование, золь-гель анализ, механические характеристики, плотность поперечных связей связующего, кинетические закономерности старения, температурные зависимости констант скоростей, прогноз изменения характеристик ЭКС во времени.

**G.N. Amarantov<sup>1, 2</sup>, E.A. Novotochinova<sup>1</sup>, Yu.T. Odintsov<sup>1</sup>,  
S.V. Eryshkanov<sup>1, 2</sup>, V.M. Zinovyev<sup>1, 2</sup>, D.S. Gurov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>JSC "Research Institute of Polymeric Materials", Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **PREDICTION OF CHANGING MECHANICAL PROPERTIES OF ENERGETIC CONDENSED SYSTEMS DURING LONG-TERM EXPLOITATION BY ESTIMATION OF CHANGING POLYMERIC BINDER STRUCTURAL PROPERTIES**

The approach to the research of thermal ageing kinetic laws estimation of filled polydivinylurethaneepoxide rubber based on energetic condensed systems (PD-type ECS) is proposed. Furthermore, the approach for prediction of ECS based on products mechanical properties with regard to the binder structural properties changes, determined by the equilibrium swelling method is proposed. Thermal ageing laws estimations of ECS are determined in accelerated experiments in thermostating temperature range of 60–80 °C.

The extension of the studied processes during the thermal ageing (destruction and cross-linking) was observed by mechanical properties changes. The mechanical properties changes were determined by single-axis tension of sample-of-blade and by structural properties changes of the polymeric binder (notably, the molecular weight of the chain section between cross-links in the cross-linked network and the cross-link density) ascertained by the swelling limit values according to Flory–Renher equation.

The experimental data processing is carried out by the first order kinetic equation. The rate constants temperature dependence of researched processes is established by Arrhenius dependence. The satisfactory correlation of mechanical and structural properties changes with ageing of polymeric binder is shown.

The techniques to study of destruction processes laws, evolving during the ECS ageing is proposed and tested. The destruction processes laws are needed for the prediction of product mechanical state during their exploitation in heat-stressed environmental conditions.

The possibility of prediction of ECS mechanical state when exploitation of ECS-based systems with kinetic laws obtained by the cross-linking density change of the binder was verified.

**Keywords:** energy condensed systems (ECS), accelerated thermal ageing, destruction, cross-linking, sol-gel analysis, mechanical properties, cross-link density of binder, ageing kinetic laws, temperature dependences of rate constants, prediction of changing ECS properties in time.

### **Введение**

В настоящее время основным экспериментальным методом прогноза изменения механических характеристик энергетических конденсированных систем (ЭКС) в течение длительной эксплуатации изделий на их основе является ускоренное тепловое старение.

Установлено, что при тепловом старении рассматриваемых ЭКС изменение механических характеристик происходит за счет двух конкурирующих разнонаправленных макропроцессов: структурирования и деструкции [1]. Указанные процессы развиваются с различными ско-

ростями и различными температурными коэффициентами, определяющими скорость и направление изменения механических характеристик состава в зависимости от температуры среды. Показано, что при эквивалентных температурах эксплуатации изделий, не превышающих 25 °С (климатические условия территории РФ), изменение механических характеристик ЭКС практически определяется процессом структурирования, а при более высоких температурах значим вклад обоих процессов.

Для установления кинетических закономерностей изменения механических свойств ЭКС во времени выполняются две серии экспериментов. Для изучения процессов структурирования отработана методика по ускоренному тепловому старению образцов в виде стандартных лопаточек для механических испытаний, помещаемых в специальные камеры. При необходимости учета вклада обоих процессов (например, для прогноза механического состояния изделий в общеклиматическом исполнении) проводится дополнительное исследование изменения механических характеристик составов в процессе ускоренного старения образцов в виде цилиндрических блоков диаметром 90–120 мм. В этих условиях эксперимента значим вклад процессов и структурирования, и деструкции. Далее совместной обработкой результатов обеих серий испытаний вычисляются кинетические закономерности развития процесса деструкции, после чего устанавливается вид комбинированной зависимости, пригодной для прогноза изменения механических свойств изделий в любых температурно-климатических условиях. В общем виде кинетическое уравнение для прогноза имеет вид

$$\frac{\varepsilon_{\tau}}{\varepsilon_0} = \left( \frac{\varepsilon_{\tau}}{\varepsilon_0} \right)_{\text{стр}} + \left( \frac{\varepsilon_{\tau}}{\varepsilon_0} \right)_{\text{дестр}}, \quad (1)$$

где  $\frac{\varepsilon_{\tau}}{\varepsilon_0}$  – уровень изменения относительной деформации ЭКС относи-

тельно исходных значений  $\varepsilon_0$  за период  $\tau$ , сут;  $\left( \frac{\varepsilon_{\tau}}{\varepsilon_0} \right)_{\text{стр}}$  и  $\left( \frac{\varepsilon_{\tau}}{\varepsilon_0} \right)_{\text{дестр}}$  – со-

ответственно вклады структурирующей и деструктивной составляющих в формирование механических характеристик ЭКС при тепловом старении.

В соответствии со сложившейся практикой для прогноза механического состояния изделий из составов рассматриваемого класса применяются кинетические закономерности, определяемые на основе данных по изменению относительной деформации составов ( $\epsilon$ , %) в экспериментах по ускоренному тепловому старению. Прогноз других контролируемых механических величин (максимального напряжения  $\sigma$ , МПа, и модуля упругости  $E$ , МПа) осуществляется на основании статистических данных о взаимосвязях характеристик с относительной деформацией с опорой на хорошо выполняемый для ЭКС данного типа принцип инвариантности взаимосвязи механических характеристик относительно условий старения [1].

Несмотря на то что применяемый подход позволяет получить практически полный объем кинетических характеристик, необходимых для прогноза, рассмотрена возможность замены механических испытаний изучением структурных изменений, происходящих в связующем ЭКС в процессе теплового старения.

Постановка работы в данном направлении обусловлена:

- необходимостью получения дополнительной экспериментальной информации, подтверждающей сформулированные представления о механизме развивающихся в ЭКС при старении процессов;
- тем фактом, что на практике не всегда имеется достаточное количество материала для организации необходимых механических испытаний;
- высокими материальными и трудовыми затратами при организации работ по изложенной схеме, особенно при необходимости получения кинетической информации о развитии процессов деструкции.

### **Экспериментальная часть**

Ускоренное тепловое старение образцов ЭКС выполнено в соответствии с ГОСТ [2]. Температуры термостатирования составили 60, 70 и 80 °С. При каждой температуре произведено не менее пяти съёмов. Максимальные сроки термостатирования составляли 350, 220 и 80 сут соответственно.

Состаренные образцы-лопаточки и образцы-блоки (после их расточки на диски толщиной 7,5 мм и разделки на лопаточки), во-первых, подвергались механическим испытаниям (в статье приведены результаты испытаний при температуре +20 °С и стандартной скорости рас-

тяжения  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ), во-вторых, оценивались структурные изменения связующего методом равновесного набухания в органическом растворителе.

Образцы для набухания массой около 0,5 г отбирались после каждого съема с ускоренного старения. Расчет концентрации поперечных связей ( $N$ , моль/ $\text{м}^3$ ) и средней молекулярной массы звена макромолекулы, заключенного между поперечными связями ( $M_c$ , кг/моль) по экспериментально установленным величинам предела набухания образцов, основан на уравнении Флори – Ренера [2–4]:

$$M_c = - \frac{\rho_k \cdot \nu_p \left( v_2^{1/3} - \frac{2 \cdot v_2}{f} \right)}{\ln(1 - v_2) + v_2 + \chi \cdot v_2^2}, \quad (2)$$

$$N = \frac{\rho_k}{M_c}, \quad (3)$$

$$v_2 = \frac{1}{1 + Q_\infty}, \quad (4)$$

$$Q_\infty = \frac{\rho_k}{\rho_p} \cdot \frac{\left( \frac{P_{\text{наб}} - P_{\text{нач}}}{P_{\text{нач}}} \right) + S}{F - S}, \quad (5)$$

где  $\rho_k$  – плотность каучука, кг/ $\text{м}^3$ ;  $\nu_p$  – молярный объем растворителя,  $\text{м}^3/\text{моль}$ ;  $v_2$  – объемная доля каучука в предельно набухшем образце;  $f$  – функциональность узла сетки;  $\chi$  – параметр термодинамического взаимодействия Хаггинса для данной пары растворитель (толуол) – каучук;  $Q_\infty$  – равновесная предельная степень набухания каучука в толуоле;  $P_{\text{наб}}$  – вес образца после набухания в растворителе, г;  $P_{\text{нач}}$  – исходный вес образца, г;  $\rho_p$  – плотность толуола, кг/ $\text{м}^3$ ;  $F$  – массовая доля связующего в наполненном образце (по рецептуре);  $S$  – массовая доля растворимых компонентов по отношению к массе исходного образца.

## Результаты

На рис. 1 в безразмерном виде представлены результаты эксперимента по ускоренному тепловому старению образцов-лопаточек, в котором, как уже отмечено выше, преимущественно протекают про-

цессы структурирования. Из данных рисунка следует удовлетворительная корреляция между сравниваемыми величинами.

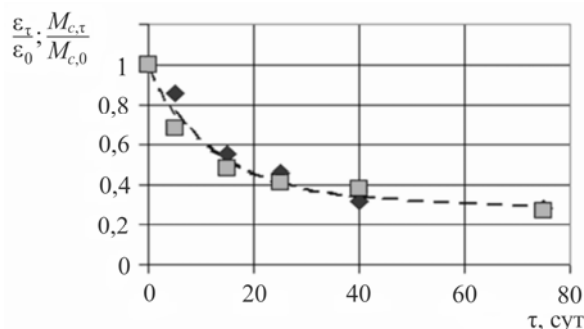


Рис. 1. Кинетика изменения относительной деформации и средней молекулярной массы звена цепи одного из штатных ЭКС типа ПД при тепловом старении образцов-лопаточек:  $\blacklozenge$  – молекулярная масса отрезка цепи, заключенного между поперечными связями;  $\blacksquare$  – относительная деформация. Температура теплового старения 353 К (80 °С)

Кинетическая обработка экспериментальных данных по ускоренному старению образцов 15 ЭКС самой многочисленной рецептурной группы составов типа ПД [1, 6] показала, что изменение в процессе старения величин  $\left(\frac{\epsilon_{\tau}}{\epsilon_0}\right)_{\text{стр}}$  и  $\left(\frac{M_c}{M_{c,0}}\right)_{\text{стр}}$  за счет структурирующих про-

цессов удовлетворительно описывается кинетическим уравнением первого порядка:

$$(X)_{\text{стр}} = \exp(-k_{\text{стр}}(T) \cdot \tau), \quad (6)$$

где  $X - \epsilon_{\tau}/\epsilon_0$  или  $M_{c,\tau}/M_{c,0}$ .

Статистической обработкой полученных кинетических данных установлены температурные зависимости констант скоростей изменения при старении относительной деформации и средней молекулярной массы отрезка полимерной цепи макромолекулы связующего:

$$k_{\text{стр}}^{\epsilon}(T) = 3,43 \cdot 10^9 \cdot \exp\left(-\frac{76850}{RT}\right), \quad (7)$$

$$k_{\text{стр}}^{M_c}(T) = 5,77 \cdot 10^9 \cdot \exp\left(-\frac{78570}{RT}\right), \quad (8)$$

где 76 850 и 78 570 – температурные коэффициенты скорости развития процесса структурирования, установленные соответственно по изме-

нению при старении относительной деформации ЭКС и средней молекулярной массы отрезка полимерной цепи макромолекулы связующего, Дж/моль;  $R=8,31$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Практическое совпадение установленных температурных зависимостей констант скоростей изменения при тепловом старении механических и структурных характеристик, а также одинаковый ход кинетических кривых (см. рис. 1) свидетельствует о том, что изменения контролируемых величин при старении вызваны развитием одних и тех же процессов в полимерном связующем ЭКС.

На рис. 2 приведены результаты прогноза изменения относительной деформации ЭКС для изделия, эксплуатирующегося в регионах с умеренно теплым климатом (представительный пункт Новороссийск) [7]. Для прогноза использованы кинетическое уравнение первого порядка (6) и соответствующие температурные зависимости констант скоростей (7), (8). При этом следует отметить факт многолетнего успешного применения кинетического уравнения (6) с константой скорости, определенной по результатам ускоренного старения образцов-лопаточек (уравнение (7)), для целей прогноза механических характеристик изделий из составов рассматриваемой рецептурной группы [8], эксплуатируемых в климатических условиях РФ.

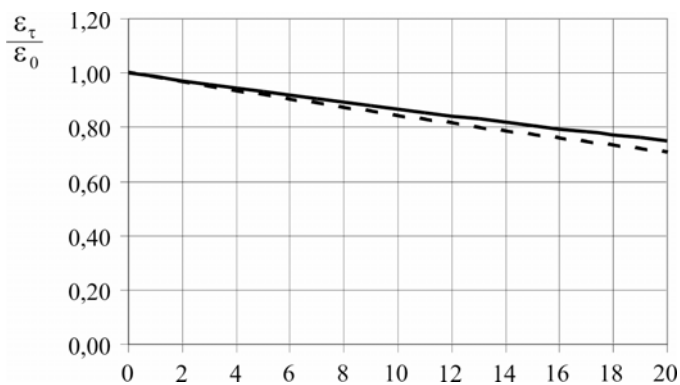


Рис. 2. Прогноз изменения относительной деформации составов изделий на основе ЭКС серии ПД при эксплуатации в условиях региона с умеренно теплым климатом (представительный пункт Новороссийск). Прогноз выполнен по кинетическому уравнению (6) с применением температурной зависимости константы скорости процесса, определенной по изменению относительной деформации (7) – кривая А (—); по изменению относительной молекулярной массы (8) – кривая Б (---)

Представленные результаты свидетельствуют о том, что полученные кинетические закономерности изменения при старении струк-

турных характеристик ЭКС типа ПД вполне пригодны для целей прогнозирования изменения механических характеристик составов изделий, эксплуатируемых в подобных климатических условиях.

На рис. 3 представлены характерные результаты определений исследуемых величин (в безразмерном виде) после ускоренного теплового старения образцов-блоков, т.е. в условиях, в которых, как уже было отмечено ранее, свойства составов меняются за счет развития при старении обоих процессов: структурирования и деструкции. (Ввиду ограниченного объема имеющейся информации по исследованию образцов-блоков на рис. 3 и ниже приведены результаты испытаний образцов конкретного состава). Из данных рисунка следует корреляция изменений при старении максимального напряжения и модуля упругости ЭКС с изменениями плотности поперечных связей связующего. При сравнении изменений в процессе старения относительной деформации состава с изменениями средней молекулярной массы отрезка цепи, заключенного между поперечными связями, корреляция наблюдается до точки максимума кривой изменения деформации, далее прирост молекулярной массы резко возрастает.

Учитывая, что в настоящее время кинетическая обработка данных, полученных в ускоренных экспериментах с образцами-блоками, выполняется до точки максимума кинетических кривых, по данным, представленным на рис. 3, можно сделать выводы, аналогичные полученным ранее при анализе и обработке результатов экспериментов с образцами-лопаточками, т.е. об удовлетворительной корреляции изменений при старении механических и структурных характеристик составов и о потенциальной пригодности результатов кинетической обработки, выполненной по изменению при старении полимерной структуры ЭКС, для целей прогноза.

Принимая во внимание полученные результаты и вывод о возможности замены при установлении кинетических закономерностей старения непосредственных механических испытаний определениями показателей, характеризующих плотность поперечной сшивки связующего ЭКС, далее исследование развивалось в направлении поиска условий ускоренных экспериментов, а именно вида образцов, позволяющих изучать непосредственно развитие деструктивных процессов при старении составов взамен затратного и трудоемкого эксперимента с образцами-блоками.



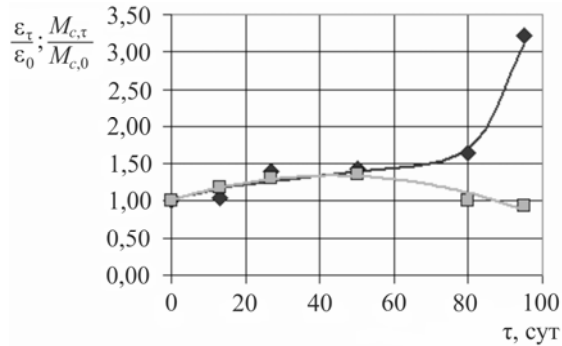


Рис. 3. Сопоставление изменения при ускоренном тепловом старении образцов (в виде блоков) ЭКС стандартных механических величин и структурных характеристик их полимерного связующего:  $\blacklozenge$  – молекулярная масса отрезка цепи, заключенного между поперечными связями;  $\blacksquare$  – относительная деформация. Температура старения 343 К (70 °С)

По мнению авторов, удовлетворительные результаты получены при ускоренном старении образцов ЭКС в виде столбиков квадратного сечения (примерные размеры 20×20×30 мм), забронированных по боковым и нижней граням тонким слоем эпоксидного бронирующего состава, нанесенного на алюминиевую фольгу. Шестая грань оставалась свободной от бронепокрытия и герметизировалась только с помощью фольги. Применяемый эпоксидный состав отверждался в течение 7 ч при комнатной температуре.

На рис. 4 приведены сравнительные результаты определений кинетики изменения относительной деформации и структурных характеристик (средней молекулярной массы отрезка цепи) образцов штатного состава в виде стандартных лопаточек (в образцах в основном протекают процессы структурирования), образцов-блоков (в условиях ускоренного теплового старения протекают и процессы структурирования, и процессы деструкции) и образцов-столбиков, в которых при тепловом старении преимущественно развиваются процессы деструкции.

На рис. 5 приведены результаты расчета прироста относительной деформации состава за счет развития процесса деструкции, вычисленного в соответствии с изложенной выше процедурой по результатам механических испытаний образцов-блоков и образцов-лопаточек по приведенной зависимости, в сравнении с данными, полученными в экспериментах с образцами-столбиками:

$$\left( \begin{array}{c} \varepsilon_{\tau} \\ \varepsilon_0 \end{array} \right)^{T_i, \tau_i} = \left( \begin{array}{c} \varepsilon_{\tau} \\ \varepsilon_0 \end{array} \right)_{\text{блок}}^{T_i, \tau_i} - \left( \begin{array}{c} \varepsilon_{\tau} \\ \varepsilon_0 \end{array} \right)_{\text{лоп}}^{T_i, \tau_i} \quad (9)$$

Из представленных на рисунке данных следует, что по крайней мере в начальном периоде развития процесса кинетические кривые совпадают.

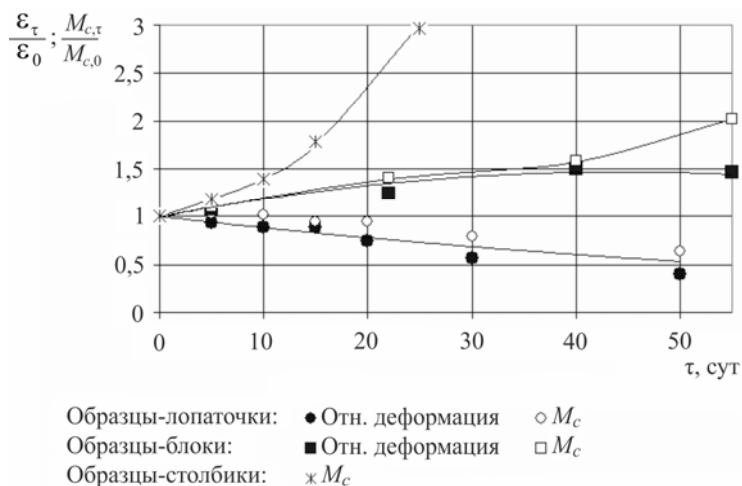


Рис. 4. Кинетика изменения относительной деформации и относительной молекулярной массы звена цепи в процессе теплового старения образцов ЭКС в виде лопаточек, блоков и столбиков. Температура теплового старения 353 К (80 °С)

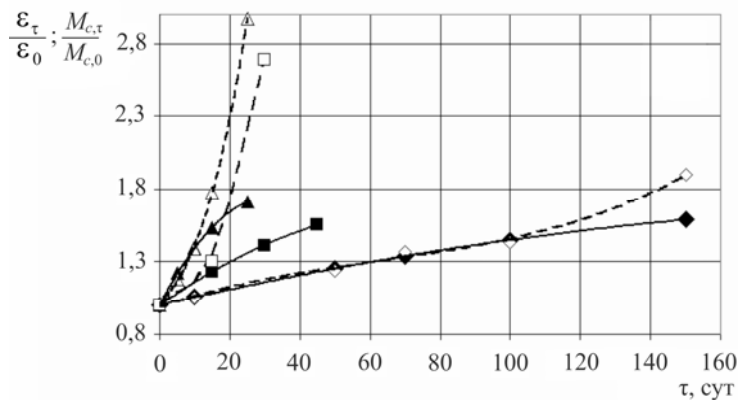


Рис. 5. Кинетические кривые изменения относительной деформации (◆ ■ ▲) и относительной массы звена цепи (◇ □ Δ) за счет развития процесса деструкции в ходе теплового старения образцов ЭКС при температурах 333, 343 и 353 К (◆ – 60, ■ – 70, ▲ – 80 °С)

Кинетической обработкой начальных участков кривых, представленных на рис. 5, с помощью следующих уравнений первого порядка:

$$(X)_{\text{дестр}} = 1 - \exp(k_{\text{дестр}}(T) \cdot \tau), \quad (10)$$

определена температурная зависимость развития при старении ЭКС процесса деструкции

$$k_{\text{дестр}}^{\varepsilon}(T) = 15,2 \cdot 10^{13} \cdot \exp\left(-\frac{104\,800}{RT}\right), \quad (11)$$

$$k_{\text{дестр}}^{M_c}(T) = 6,8 \cdot 10^{13} \cdot \exp\left(-\frac{102\,100}{RT}\right), \quad (12)$$

где 104 800 и 102 100 – температурные коэффициенты скорости развития процесса деструкции, установленные соответственно по изменению при старении относительной деформации ЭКС и средней молекулярной массы отрезка полимерной цепи макромолекулы связующего, Дж/моль.

Полученные значения температурных коэффициентов для оценки вклада процесса деструкции при старении ЭКС, как и в случае определения температурных зависимостей константы скорости развития процесса структурирования (7, 8), близки между собой.

По мнению авторов, такое совпадение результатов свидетельствует:

- о том, что при тепловом старении при данных температурах в забронированных образцах-столбиках организуются условия, при которых в ЭКС развиваются в основном процессы деструкции;

- правомерности разработанного ранее подхода к определению кинетических закономерностей вклада процесса деструкции в формирование при старении механических характеристик ЭКС типа ПД в составе зарядов по данным теплового старения образцов-блоков и образцов-лопаточек.

При наборе соответствующей положительной статистики данные, полученные обработкой начальных участков кинетических кривых прироста средней молекулярной массы отрезка цепи для образцов-столбиков, вполне могут быть использованы для прогноза вклада деструктивной составляющей в формирование механических характеристик составов изделий, длительно эксплуатируемых в условиях повышенных температур (например, в условиях тропического климата [9]).

### **Заключение**

1. Предложен подход к прогнозу механического состояния составов изделий на основе ЭКС серии ПД путем исследования кинетических закономерностей теплового старения составов по изменению структурных характеристик связующего, определенных методом равновесного набухания. Важным достоинством предложенного метода является возможность определения искомых параметров на малых образцах (порядка полуграмма) не обязательно правильной геометрической формы.

2. Показана удовлетворительная корреляция относительных изменений механических и структурных характеристик образцов ЭКС типа ПД при ускоренном тепловом старении.

3. Показана возможность изучения закономерностей развития процессов деструкции при старении ЭКС типа ПД на малогабаритных образцах-столбиках.

4. Совпадением полученных кинетических результатов описания развития деструктивных процессов в составах типа ПД, определенных по результатам механических испытаний образцов-блоков и образцов-лопаточек и методом равновесного набухания образцов, подтверждена возможность применения обоих подходов для прогнозирования вклада деструктивных процессов в изменение механических характеристик ЭКС типа ПД в условиях длительной эксплуатации изделий.

### **Библиографический список**

1. Одинцов Ю.Т., Новоточинова Е.А. Физико-химическая стабильность составов типа ПД и сохраняемость механических характеристик изделий на их основе: науч.-метод. пособие / Науч.-исслед. ин-т полимер. материалов. – Пермь, 2009. – 104 с.

2. ГОСТ 9.707–81. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные. Методы ускоренного испытания на климатическое старение. – М.: Изд-во стандартов, 1990.

3. Тагер А.А. Физикохимия полимеров. – М.: Химия, 1978. – 544 с.

4. Flory P., Renher J. Statistical mechanics of cross-linked polymer networks II. Swelling // Journal of Chemical Physics. – 1943. – Vol. 11, iss. 11. – P. 521–526.

5. Поляков Б.С. Исследование процессов старения смесевых твердых топлив на основе полиэфируретанового и тиокольного связующих: дис. канд. ... техн. наук. – Пермь, 1970. – 171 с.

6. Одинцов Ю.Т., Новоточинова Е.А., Хименко Л.Л. О стабилизации механических свойств при старении традиционных СРТТ на основе полидивинилуретанэпоксидного каучука // Энергетические конденсированные системы: материалы V Всерос. конф., 26–28 октября 2010, Черногоровка / Ин-т проблем хим. физики. – М., 2010. – С. 173–174.

7. ГОСТ 16350–80. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. Климат СССР / Гос. комитет СССР по стандартам. – М., 1986. – 139 с.

8. Анализ возможных путей обоснованного увеличения сроков служебной пригодности изделий из смесевых составов / С.В. Ерышканов, Ю.Т. Одинцов, Е.А. Новоточинова, В.М. Зиновьев // Материалы и технологии XXI века: докл. III Всерос. науч.-практ. конф. Мол. ученых и специалистов, 18–20 сентября 2013, г. Бийск. – Бийск: Изд-во Алтай гос. техн. ун-та, 2013. – С. 159–164.

9. ГОСТ 24482–80. Микроклиматические районы земного шара с тропическим климатом. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей / Гос. комитет СССР по стандартам. – М., 1981. – 94 с.

### References

1. Odintsov Yu.T., Novotochinova E.A. Fiziko-khimicheskaya stabilnost sostavov tipa PD i sokhranyaemost mekhanicheskikh kharakteristik izdeliy na ikh osnove [Physico-chemical stability of PD-type compositions and storageability of mechanical properties of products on their basis]. Perm: JSC “Research institute of polymeric materials”, 2009. 104 p.

2. GOST 9.707-81. Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Materialy polimernye. Metody uskorennoogo ispytaniya na klimaticheskoe starenie [All-Union State Standard 9.707-81. Unified system of corrosion and ageing protection. Polymeric materials. Methods of accelerated climatic ageing tests]. Moscow: Izdatelstvo standartov, 1990.

3. Tager A.A. Fizikokhimiya polimerov [Physics and chemistry of polymers]. Moscow: Khimiya, 1978. 544 p.

4. Flory P., Renher J., Statistical mechanics of cross-linked polymer networks II. Swelling. *Journal of Chemical Physics*, 1943, vol. 11, iss. 11, pp. 521-526.

5. Polyakov B.S. Issledovanie protsessov stareniya smesevykh tverdykh topliv na osnove poliefiruretanovogo i tiokolnogo svyazuyushchikh [Inves-

tigation of ageing process of solid propellants based on polyurethane and thiokol]. Ph. D. thesis. Perm, 1970. 171 p.

6. Odintsov Yu.T., Novotochinova E.A., Khimenko L.L. O stabilizatsii mekhanicheskikh svoystv pri starenii traditsionnykh SRTT na osnove polidiviniluretanepoksidnogo kauchuka [On mechanical properties stabilization when ageing solid propellants with polydivinylurethaneepoxide rubber]. *Materialy V Vserossiyskoy konferentsii "Energeticheskie kondensirovannye sistemy"*, Chernogolovka. Moscow, 2010, pp. 173-174.

7. GOST 16350-80. Rayonirovanie i statisticheskie parametry klimaticheskikh faktorov dlya tekhnicheskikh tseley. Klimat SSSR [All-Union State Standard 16350-80. Climate of the USSR. Regionalism and statistical parameters of climatic factors for technical purposes]. Moscow: Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam, 1986. 139 p.

8. Eryshkanov S.V., Odintsov Yu.T., Novotochinova E.A., Zinovev V.M. Analiz vozmozhnykh putey obosnovannogo uvelicheniya srokov sluzhebnoy prigodnosti izdeliy iz smesevykh sostavov [Analysis of possible ways of reasonable increase of composition products life time]. *Doklady III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov "Materialy i tekhnologii XXI veka"*. Biysk, 2013, pp. 159-164.

9. GOST 24482-80. Mikroklimaticheskie rayony Zemnogo Shara s tropicheskim klimatom. Rayonirovanie i statisticheskie parametry klimaticheskikh faktorov dlya tekhnicheskikh tseley [All-Union State Standard 24482-80. Macrocclimate regions of the Earth with tropical climate. Regionalism and statistical parameters of climatic factors for technical purposes]. Moscow: Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam, 1981. 94 p.

### **Об авторах**

**Амарантов Георгий Николаевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по ОКР – главный конструктор АО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов» (614113, г. Пермь, ул. Чистопольская, д. 16, e-mail: niipm@pi.ccl.ru), профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29).

**Новоточинова Екатерина Алексеевна** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, начальник отдела АО «Научно-исследователь-

ский институт полимерных материалов» (614113, г. Пермь, ул. Чистопольская, д. 16, e-mail: niipm@pi.ccl.ru).

**Одинцов Юрий Тимофеевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела АО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов» (614113, г. Пермь, ул. Чистопольская, д. 16, e-mail: niipm@pi.ccl.ru).

**Ерышканов Станислав Владимирович** (Пермь, Россия) – старший научный сотрудник АО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов» (614113, г. Пермь, ул. Чистопольская, д. 16, e-mail: niipm@pi.ccl.ru), аспирант кафедры «Технология полимерных материалов, порохов и твердых ракетных топлив» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29).

**Зиновьев Василий Михайлович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, начальник отдела АО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов» (614113, г. Пермь, ул. Чистопольская, д. 16, e-mail: niipm@pi.ccl.ru), профессор кафедры «Технология полимерных материалов, порохов и твердых ракетных топлив» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29).

**Гуров Даниил Сергеевич** (Пермь, Россия) – инженер АО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов» (614113, г. Пермь, ул. Чистопольская, д. 16, e-mail: niipm@pi.ccl.ru).

### About the authors

**Georgiy N. Amarantov** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Deputy Director of JSC “Research Institute of Polymeric Materials” (16, Chistopolskaya st., Perm, 614113, Russian Federation, e-mail: niipm@pi.ccl.ru), Professor, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

**Ekaterina A. Novotochinova** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Head of the Department, JSC “Research Institute of Polymeric Materials” (16, Chistopolskaya st., Perm, 614113, Russian Federation, e-mail: niipm@pi.ccl.ru).

**Yuriy T. Odintsov** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Deputy Head of the Department, JSC “Research Institute of Polymeric Materials” (16, Chistopolskaya st., Perm, 614113, Russian Federation, e-mail: niipm@pi.ccl.ru).

**Stanislav V. Eryshkanov** (Perm, Russian Federation) – Senior Researcher, JSC “Research Institute of Polymeric Materials” (16, Chistopolskaya st., Perm, 614113, Russian Federation, e-mail: niipm@pi.ccl.ru), Doctoral Student, Department of Technology of Polymeric Materials, Powders and Solid Propellants, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

**Vasily M. Zinovyev** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department, JSC “Research Institute of Polymeric Materials” (16, Chistopolskaya st., Perm, 614113, Russian Federation, e-mail: niipm@pi.ccl.ru), Professor, Department of Technology of Polymeric Materials, Powders and Solid Propellants, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

**Daniil S. Gurov** (Perm, Russian Federation) – Engineer, JSC “Research Institute of Polymeric Materials” (16, Chistopolskaya st., Perm, 614113, Russian Federation, e-mail: niipm@pi.ccl.ru).

Получено 2.03.2015