

УДК 621.039

DOI 10.34822/1999-7604-2021-4-22-27

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ ЕСТЕСТВЕННОГО СТАРЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЗАДАЧАХ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ СТРУКТУРНО И ФУНКЦИОНАЛЬНО СЛОЖНЫХ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ СИСТЕМ С ДЛИТЕЛЬНЫМИ СРОКАМИ АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ

В. А. Острейковский , А. В. Сорочкин

Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

 *E-mail: academicostr@yandex.ru*

Представлено теоретическое обоснование закономерности реальных необратимых процессов старения конструкционных материалов элементов оборудования структурно и функционально сложных систем, а также описаны математические модели различных процессов, влияющих на показатели их долговечности на субмикроскопическом, микроскопическом и макроскопическом уровне.

Ключевые слова: долговечность, физико-математические модели, необратимые процессы, естественное старение, структурно и функционально сложные системы.

PHYSICO-MATHEMATICAL MODELS OF THE PATTERNS OF THE NATURAL AGING PROCESSES OF STRUCTURAL MATERIALS IN PROBLEMS OF DURABILITY OF THE EQUIPMENT OF STRUCTURALLY AND FUNCTIONALLY COMPLEX AND CRITICALLY IMPORTANT SYSTEMS WITH LONG PERIODS OF ACTIVE EXISTENCE

V. A. Ostreikovskiy , A. V. Sorochkin

Surgut State University, Surgut, Russia

 *E-mail: academicostr@yandex.ru*

The patterns of actual irreversible processes of aging of structural materials of equipment elements of structural and functional complex systems are theoretically substantiated. Mathematical models of various processes, which influence indicators of durability at submicroscopic, microscopic and macroscopic levels, are presented.

Keywords: durability, physico-mathematical models, irreversible processes, natural aging, structurally and functionally complex systems.

Введение

В настоящее время расчет и анализ показателей долговечности (ресурса, срока службы и их остаточных значений) структурно и функционально сложных систем (СФСС) и других показателей надежности, безопасности, эффективности и качества осуществляется, как правило, методами теорий длительной прочности и значительно реже – с применением теоретико-вероятностных моделей.

Следует подчеркнуть, что данные методы обеспечены обязательными для применения соответствующими нормативными документами уровня государственных стандартов.

Однако уже в последней четверти XX в. И. Р. Пригожиным математически строго доказаны многие теоретические обоснования принципиально новой концепции внутреннего времени любых объектов биосферы В. И. Вернадского [1–4].

Для реализации многих положений теории асимметрии внутреннего времени в задачах долговечности необходимо знание результатов обработки статистических данных с целью ис-

следования закономерностей реальных необратимых процессов естественного старения конструкционных материалов элементов оборудования СФСС не только в виде точек на траекториях во времени, но прежде всего в виде функций распределения состояния старения [5–11].

Материалы и методы

Представлено теоретическое обоснование закономерности реальных необратимых процессов естественного старения конструкционных материалов элементов оборудования структурно и функционально сложных систем, а также математические модели различных процессов, влияющих на показатели долговечности структурно и функционально сложных систем на суб-, микро- и макроскопическом уровне.

Приведены математические модели различных процессов, влияющих на показатели долговечности СФСС.

Результаты и их обсуждение

Современная наука о естественном старении конструкционных материалов элементов оборудования СФСС базируется на трех видах исследований: субмикроскопических, микроскопических и макроскопических.

Субмикроскопический уровень предполагает получение представлений о конструкционных свойствах материалов на уровне строения атомов молекул и кристаллических решеток для получения информации о дислокациях кристаллов и их движении, диффузионных и химических процессах, лежащих в основе адсорбции, распаде твердых растворов, изменении механических, электрических и магнитных свойств твердых тел для решения задач теории прочности конструкционных материалов элементов оборудования СФСС [12–19].

Микроскопический уровень исследования процессов старения конструкционных материалов представляет сведения о процессах в небольших объемах тел (зерна, границы зерен, термические превращения).

Математические модели физико-математических процессов изменений на суб- и микроскопическом уровне приведены в табл. 1 [14, 20–22].

Таблица 1

Модели процессов старения конструкционных материалов сложных систем на субмикроскопическом и микроскопическом уровне

№	Физико-химический процесс	Модель процесса
1	Диффузия	$D(T^0) = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_1 T^0}\right)$
2	Химические реакции	$C = C_0 e^{-k_p T^0}, k_p = k_{p0} \exp\left(-\frac{E_a}{R_1 T^0}\right)$
3	Рекристаллизация твердого тела	$\frac{dx}{dt} = k^*(1-x) \exp\left(-\frac{E_a}{R_1 T^0}\right)$
4	Распад твердых растворов	$\frac{C_1 - C_2}{C_3 - C_2} = \exp(-at^b)$
5	Фазовые превращения в твердых телах	$n = a_1 e^{-\frac{E_a}{R_1 T^0}} e^{-\frac{a_2}{T^0} \frac{\gamma^3}{(\Delta T^0)}}$
6	Распад мартенситной структуры в закаленных сталях	$V = a_3 V_0 \left[1 - \exp\left(-te^{-\frac{E_a}{R_1 T^0}}\right)\right]$
7	Удельная электропроводность	$\sigma_a = \sigma_{a0} \exp(-\alpha_T T^0)$
8	Удельная электропроводность диэлектриков	$\sigma_a = \sigma_{a0} \exp(a_4 E)$
9	Диэлектрическая проницаемость	$\varepsilon_n = \varepsilon_{n0} \exp(\alpha_{En} T^0)$
10	Напряженность электрического поля при тепловом пробое	$E_{кр} = E_{кр0} \exp(-\alpha_E T^0)$
11	Электрическая прочность	$E_{пр} = E_{пр0} - a_5 \sigma_m^{b_1}$

Примечание: t – время; $D(T^0)$ – коэффициент диффузии; T^0 – абсолютная температура; D_0 – коэффициент диффузии при $T = 0^\circ\text{C}$; E_a – энергия активации; R_1 – универсальная газовая постоянная; C – концентрация вещества; C_0 – начальная концентрация исходного вещества; k_p – константа скорости химической реакции;

$\frac{dx}{dt}$ – скорость рекристаллизации; k^* – коэффициент, зависящий от материала; C_1 – концентрация оставшихся в растворе частиц; C_2 – концентрация примесей на границе зародыша; C_3 – концентрация примесей на достаточно большом удалении от зародышей; a – коэффициент, характеризующий число и объем зародышей; n – число циклов кристаллизации; V – объем материала; γ – коэффициент поверхностного натяжения; σ_{30} – удельная электрическая проводимость при $T = 0^\circ\text{C}$; $\alpha_T, \alpha_{En}, \alpha_E$ – температурные коэффициенты; E – напряженность электрического поля; $\varepsilon_{п0}$ – начальная диэлектрическая проводимость при $T = 0^\circ\text{C}$; $E_{кр0}$ – напряженность электрического поля при пробое для $T = 0^\circ\text{C}$; σ_M – механическое напряжение; $E_{пр0}$ – напряженность электрического поля при пробое для $\sigma_M = 0$; $2l$ – длина трещины.

Макроскопический уровень исследования старения предполагает изучение закономерностей путем их распределения на весь объем твердого тела (табл. 2) [14, 20–21].

Таблица 2

**Модели процессов, приводящих к потере работоспособности элементов
конструкций СФСС на макроскопическом уровне**

№	Процесс	Модель процесса
1	Рост трещин в твердых телах	$\frac{dl}{dN} = A\Delta K_I^n, \quad \frac{dl}{dN} = C\Delta K_I^n;$ $b(t) = \exp\left[\ln b_{кр} - \frac{t}{\alpha} \left(\frac{\sigma_{ср}}{R_{\rho 0,2}^T}\right)^2\right]$
2	Деформация твердого тела под напряжением	$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \exp\left(-\frac{\Delta G}{R_1 T^0}\right)$
3	Ползучесть	$\dot{\varepsilon} = \alpha \exp\left(-\frac{E_a}{R_1 T^0}\right)$
4	Начальная стадия ползучести	$\dot{\varepsilon} = \beta t^m$
5	Изменение относительного удлинения	$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_m}{E_1} + \frac{\sigma_m}{E_2} (1 - e^{-t/\tau}) + \frac{\sigma_m}{\eta_r}$
6	Вязкость при запаздывающей упругой деформации	$\eta_1 = A_1 \exp\left(\frac{\Delta E_a}{R_1 T^0}\right)$
7	Вязкость при течении материала	$\eta_2 = B \exp\left(\frac{\Delta E_a}{R_1 T^0}\right)$
8	Старение полупроводниковых ферромагнетиков	$\Delta\mu(t) = \Delta\mu_{max} \frac{1 - e^{ut}}{1 - \omega e^{ut}}$
9	Старение конденсаторов	$I_{ут}(t) = I_{ут max} [1 - \exp(-k_1 t^{n_1})]$
10	Старение терморезисторов	$\Delta R(t) = \Delta R_{max} [1 - \exp(-k_1 t^{n_1})]$
11	Старение терморезисторов при одновременном протекании процессов диффузии примесей и химических реакций в рабочем материале	$\Delta R(t) = a + b \exp(-ct);$ $\Delta R(t) = a_1 - \frac{b_1}{(t + d)^{n_1}}$
12	Скорость коррозии	$\frac{dy}{dt} = C_0 k_p \exp(\alpha_1 T^0)$ $\frac{dy}{dt} = \gamma C_0 e^{\alpha_1 T} t^{\gamma-1}$
13	Скорость окисления циркониевых сплавов в водяном паре	$k_p = A_2 \exp\left(-\frac{E_a}{R_1 T^0}\right)$
14	Износ	$x(t) = a_2 (e^{k_2 t} - 1), \quad k_2 > 0;$ $x(t) = a_2 (1 - e^{k_2 t}), \quad k_2 < 0$
15	Износ при вращении (подшипники)	$\frac{dx}{dt} = a_3 \varepsilon_3 e^{a_3 t}, \quad a_3 = k_3 m \omega^3$

Примечание: t – время; C – число циклов нагружения; ΔK_I – размах коэффициента интенсивности напряжений; $b_{кр}$ – критическая глубина трещины; n – число центров кристаллизации; $\sigma_{ср}$ – среднее напряжение; $R_{\rho 0,2}^T$ – предел текучести; ε – деформация; E_1 – модуль упругости; E_2 – модуль упругости при запаздывающей упругой деформации; τ – постоянная времени; μ – магнитная проницаемость; $I_{ут}$ – ток утечки; ΔR – изменение сопротивления резистора; m – масса; ω – угловая скорость; ε_3 – начальный эксцентриситет; a_0 – радиус пятна касания; q_1 – заряд электрона; U – напряжение; E_{a0} – начальная энергия активации процесса разрушения; γ_1 – структурный коэффициент; k_1 – постоянная Больцмана; $a, b, c, d, \gamma, A, B, \alpha, \beta, k, n_1, u, \omega$ – константы.

Представим примеры математических моделей показателей долговечности [7–11, 15–19, 23]:

- срок службы твердых тел

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_{a0} - \gamma_1 \sigma_M}{K_1 T^0}\right); \quad (1)$$

- срок службы полимеров и неорганических диэлектриков

$$\tau = \tau_0 E^m \exp\left(\frac{\Delta E_a}{R_1 T^0}\right), \quad (2)$$

где τ_0 – постоянная времени;

E_{a0} – начальная энергия активации процесса разрушения;

E^m – энергия массы m ;

K_1 – коэффициент интенсивности напряжений;

γ_1 – структурный коэффициент;

σ_M – механическое напряжение;

R_1 – универсальная газовая постоянная;

T^0 – абсолютная температура.

На основании приведенных выше моделей и результатов обработки многочисленных экспериментальных данных длительного (в течение 20–30 лет второй половины прошлого века) опыта эксплуатации ядерных энергетических установок (ЯЭУ) Смоленской и Калининской атомных электростанций можно сделать следующие выводы:

1. Подавляющее большинство необратимых физико-химических процессов, которым могут предшествовать появления дефектов и отказов конструктивных элементов систем ЯЭУ по большим выборкам, описываются показательными функциями распределения типа:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1(t) &= e^{-kt}; \\ \rho_2(t) &= ae^{bt}; \\ \rho_3(t) &= a + be^{ct}; \\ \rho_4(t) &= ae^{bt^c}; \\ \rho_5(t) &= at^b e^{ct^d}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2. Закономерности, описывающие процессы старения оборудования на примере сложных в конструкторском и эксплуатационном плане объектов СФСС, могут быть получены путем анализа термодинамических процессов.

3. Чрезвычайно важно отметить, что многие процессы старения (химические, тепловые, электрические, радиационные и др.), приведенные в моделях табл. 1 и 2, могут оказывать одновременное действие на работоспособность элементов оборудования СФСС.

4. Закономерности, полученные по данным моделей табл. 1 и 2, могут быть распространены и на другие типы оборудования СФСС: в авиационной и ракетно-космической технике, нефтегазовой отрасли, отраслях машиностроения, на транспорте и пр. (т. е. они имеют межотраслевой характер) [1, 12–14, 24].

Заключение

1. Системно исследованы закономерности процессов естественного старения конструктивных материалов элементов оборудования с применением методов математического моделирования.

2. Закономерности, описывающие процессы старения оборудования сложных систем технических комплексов, имеющих критически важный характер, могут быть получены путем анализа термодинамических процессов (табл. 1 и 2).

3. Широкий класс необратимых физико-химических процессов, которые могут предшествовать появлению дефектов и отказов конструктивных элементов сложных систем, описывается, как правило, показательными функциями распределения.

4. Комплексы тепловых, химических, электрических, радиационных и других процессов имеют межотраслевой характер и зачастую оказывают одновременное действие на ухудшение работоспособности элементов и подсистем СФСС. Статистические данные также свидетельствуют о возможном одновременном действии необратимых факторов внешней среды и персонала, т. е. имеет место комплексное многофакторное воздействие на ухудшение состояния оборудования СФСС, что может приводить к деградации и отказам этого оборудования.

5. Статистические данные многих необратимых процессов, которые, как известно, являются причинами наличия «стрелы времени», требуют, по-видимому, общих расчетов долговечности.

6. Представляет большой научный интерес дальнейшее развитие теории долговечности СФСС, которое состоит в получении аналитических соотношений для определения значений показателей ресурса, срока службы и их остаточных оценок путем включения в расчеты оператора внутреннего времени, параметров старения на основе физико-математических моделей субмикроскопического, макроскопического и макроскопического уровня.

Литература

1. Пригожин И. Р. От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках : пер. с англ ; 2-е изд., доп. М. : Едиториал УРСС, 2002. 304 с.
2. Вернадский В. И. Философские мысли натуралиста. М. : Наука, 1988. 520 с.
3. Вернадский В. И. Размышления натуралиста. Пространство и время в неживой и живой природе. Кн. 1. М. : Наука, 1975. 168 с.
4. Вернадский В. И. Живое вещество и биосфера. М. : Наука, 1994.
5. Острейковский В. А., Лысенкова С. А. Концепция современных подходов к уровням описания процессов старения структурно и функционально сложных критически важных систем с длительными сроками активного существования // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 5–12.
6. Пригожин И. Р. Конец определенности. Время, хаос и новые законы природы. Ижевск : Ижев. республ. типография, 1999. 216 с.
7. Острейковский В. А., Денисова Т. Ю., Шевченко Е. Н. Асимметрия времени в теории прогнозирования состояния сложных динамических систем. Сургут : Печатный мир, 2018. 574 с.
8. Minkowski E. The Time Lived. Neuchatel : De la Chaux et Niestle, 1968. 401 p.
9. Уайтхед А. Н. Избранные работы по философии. М. : Прогресс, 1990. 720 с.
10. Хайдеггер М. Бытие и время ; пер. с нем. В. В. Биbihина. Санкт-Петербург : Наука, 2006. 452 с.
11. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Математическое моделирование эффекта асимметрии внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных критически важных систем // Итоги науки. Вып. 37. Избран. тр. Междунар. симпозиума по фундамент. и приклад. наукам. М. : РАН, 2018. С. 69–111.
12. Антонов А. В., Острейковский В. А. Ресурс и срок службы оборудования энергоблоков атомных станций: на примере энергоблоков Смоленской АЭС. М. : Инновац. машиностроение, 2017. 536 с.
13. Аркадов Г. В., Гетман А. Ф., Родионов А. Н. Надежность оборудования и трубопроводов и оптимизация эксплуатации АЭС. М. : Энергоатомиздат, 2010.
14. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86. М. : Энергоатомиздат, 1989.
15. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. О роли оператора энтропии при оценке и анализе показателей долговечности сложных технических динамических систем // Надежность и качество : тр. междунар. симпозиума. Т. 2. Пенза, 2019. С. 334–340.

16. Клячкин В. Н., Карпунина И. Н. Статистические методы оценки стабильности функционирования технических систем // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 2. С. 36–42.
17. Михайлов В. С. Оценка вероятности безотказной работы по результатам испытаний, не давших отказы // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 2. С. 56–60.
18. Литвиненко Р. С., Идиятуллин Р. Г., Аухадеев А. Э. Анализ использования показательного распределения в теории надежности технических систем // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 2. С. 17–22.
19. Садыхов Г. С., Артюхов А. А. Интерполяция оценки вероятности безотказного срабатывания объекта при высоких уровнях безотказности // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 1. С. 15–19.
20. Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность ; в 2 ч. Ч. 1. Критерии прочности и ресурса. Новосибирск : Наука, 2005. 494 с.
21. Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность ; в 2 ч. Ч. 2. Критерии прочности и ресурса. Новосибирск : Наука, 2005. 610 с.
22. Проников А. С. Параметрическая надежность машин. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 560 с.
23. Острейковский В. А., Лысенкова С. А. Математические модели необратимости и асимметрии времени в теории долговечности структурно и функционально сложных критически важных систем длительного активного существования // Математические идеи П. Л. Чебышева и их приложения к современным проблемам естествознания : материалы Междунар. конф. Обнинск, 14–18 мая ; Сургут 23–29 мая 2021 г. / под ред. акад. В. Б. Бетелина. Калуга : Калуж. печат. двор, 2021. С. 260–263.
24. Антонов А. В., Чепурко В. А. Применение статистических моделей для задач прогнозирования остаточного ресурса оборудования атомных станций // Математические идеи П. Л. Чебышева и их приложения к современным проблемам естествознания : материалы Междунар. конф. Обнинск, 14–18 мая ; Сургут 23–29 мая 2021 г. / под ред. акад. В. Б. Бетелина. Калуга : Калуж. печат. двор, 2021. С. 174–175.