

В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко**ОБ УЧЕТЕ СВОЙСТВА НЕОБРАТИМОСТИ ПРОЦЕССОВ
В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРУКТУРНО
И ФУНКЦИОНАЛЬНО СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**V. A. Ostreykovsky, E. N. Shevchenko**ON TAKING INTO ACCOUNT THE PROPERTIES OF IRREVERSIBILITY
OF PROCESSES IN THE PROBLEMS OF ASSESSING THE DURABILITY
OF STRUCTURALLY AND FUNCTIONALLY COMPLEX SYSTEMS**

Аннотация. Актуальность и цели. В последние десятилетия XX в. появилась новая наука – физика неравновесных процессов, оперирующая новыми понятиями: самоорганизация и диссипативные структуры, и по-новому описывающая однонаправленность времени (стрелу времени) и термин «необратимость». Этот термин тесно связан с центральным принципом книг [1–3]: асимметрией времени и оператором внутреннего времени, следовательно, с сущностью понятия долговечность в терминах надежности и безотказности и эффективности структурно и функционально сложных систем (СФСС) и, что особенно важно, критически важных технических систем. В своей книге [1], первое издание которой вышло в свет еще в 1980 г., нобелевский лауреат И. Р. Пригожин изложил формулировку трех главных тезисов для включения необратимости как фундаментального принципа современной науки: необратимые процессы столь же реальны, как и обратимые; необратимые процессы играют существенную конструктивную роль в физическом мире; необратимость глубоко связана с динамикой. Прошла почти половина века после этого события, а учет эволюции времени как главного фактора в инженерных расчетах конструкций систем практически нигде не используется. В подавляющем большинстве государственные стандарты по вопросам долговечности как в нашей стране, так и за рубежом по-прежнему основаны на методах классической динамики теорий длительной прочности. Такие методы, конечно, необходимы, однако перспективные вопросы учета эволюции времени в модусах «прошлое – настоящее – будущее» для объектов, сроки применения которых могут исчисляться многими десятилетиями (а таких уже немало), бесспорно, должны стать достижениями соответствующих НИИ и КБ. Поэтому целью данной статьи является анализ свойств необратимости процессов именно на всех этапах жизненного цикла СФСС в свете оценки таких показателей долговечности, как ресурс, срок службы и их остаточные значения в современной проблеме времени

Abstract. Background. In the last decades of the 20th century, a new science has appeared – the physics of nonequilibrium processes, operating with new concepts: self-organization and dissipative structures, and in a new way describing the unidirectionality of time (the arrow of time) and the term "irreversibility". This term is closely related to the central principle of books [1-3]: the asymmetry of time and the internal time operator, therefore, with the essence of the concept of durability in terms of reliability and reliability, and the effectiveness of structurally and functionally complex systems (SSSS) and, most importantly, critical technical systems. In his book [1], the first edition of which was published back in 1980, Nobel laureate I.R. Prigozhin set forth the formulation of three main theses for the inclusion of irreversibility as a fundamental principle of modern science: irreversible processes are as real as reversible; irreversible processes play an essential constructive role in the physical world; irreversibility is deeply connected with dynamics. Almost half a century has passed after this event, and the era of taking into account the evolution of time as the main factor in engineering calculations of system designs has not changed. The vast majority of state standards on longevity issues both in our country and abroad are still based on the methods of classical dynamics of theories of long-term strength. Such methods, of course, are necessary, however, promising issues of taking into account the evolution of time in the "past – present – future" modes for objects whose terms of application can take many decades (and there are many of them already) should undoubtedly become the achievements of the corresponding research institutes and design bureaus. Therefore, the purpose of this article is to analyze the properties of the irreversibility of processes precisely at all stages of the SPSS life cycle in the light of evaluating such indicators of longevity as a resource, service life and their residual values in the modern problem of time "past – present – future". *Materials and methods.* To implement this idea, a brief analysis of existing approaches to assessing the durability of complex systems using the theory of functional

«прошлое – настоящее – будущее». *Материалы и методы.* Для реализации этой идеи проведен краткий анализ существующих подходов к оценке долговечности сложных систем с применением теории операторов функционального анализа. *Результаты.* В статье подробно проанализированы детерминированные и вероятностные концепции природы времени и роль закономерностей необратимых процессов в этих концепциях. *Выводы.* 1. Систематизированы следствия из принятия второго начала термодинамики как фундаментального факта. 2. Хаос к несводимому вероятностному описанию динамических систем. 3. Оператор внутреннего времени T – это нелокальный оператор, порождающий новое описание классической динамики для сильно неустойчивых систем. 4. Применение оператора внутреннего времени системы позволяет по-новому оценивать «возраст» оборудования СФСС, соответствующий средним значениям таких показателей долговечности, как ресурс, срок службы и их остаточные значения.

Ключевые слова: необратимость, операторы эволюции и внутреннего времени, модусы времени «прошлое – настоящее – будущее», долговечность, ресурс, срок службы.

analysis operators has been carried out. *Results.* The article analyzes in detail the deterministic and probabilistic concepts of the nature of time and the role of the laws of irreversible processes in these concepts. *Conclusions.* 1. The consequences of the adoption of the second law of thermodynamics as a fundamental fact are systematized. 2. Chaos to an irreducible probabilistic description of dynamical systems. 3. The internal time operator T is a non-local operator that generates a new description of classical dynamics for highly unstable systems. 4. The use of the system's internal time operator allows a new assessment of the "age" of the SSSS equipment, which corresponds to the average values of such indicators of durability as a resource, service life and their residual values.

Keywords: irreversibility, evolution and internal time operators, "past – present – future" time modes, durability, resource, service life.

Сущность свойства необратимости процессов в функциональном описании систем

Вторая половина XX в. ознаменована рождением новой науки – физики неравновесных процессов. Известно, что в природе все процессы подразделены на два класса: обратимые и необратимые. И если необратимые процессы являются правилом, то обратимые – исключением. Примеры обратимых процессов: движение маятника (движение тел) без трения в пространстве, в котором исключено взаимодействие со средой, но совершенно ясно, что исключить такое взаимодействие невозможно.

Примеры необратимых процессов: вязкость, диффузия, распад нестабильных частиц и другие диссипативные структуры.

Отказываясь от траекторий, например, применяя ансамблевый подход, отказываемся от строгого детерминизма, т.е. делаем только статистические выводы, т.е. предсказываем средние результаты, даже зная рождение и рост парадигм и их упадок.

Обратимым процессам присущ строгий детерминизм, и самое главное, в обратимых процессах время течет одинаково как при $t \rightarrow -\infty$, так и при $t \rightarrow +\infty$.

Совсем иначе ведут себя необратимые процессы, такие как диффузия, вязкость и другие диссипативные структуры, изучаемые в физике неравновесных процессов. Неравновесные процессы имеют ярко выраженную однонаправленность времени: зная их прошлое, очень трудно предсказать будущее. Эффект однонаправленного времени позволяет по-новому интерпретировать термин «необратимость». Об этом красноречиво свидетельствует следующий пример – метеорологический прогноз.

Если мы можем предсказывать положение Земли на орбите вокруг Солнца установленной динамической системой двух тел на миллионы лет вперед, то прогноз погоды описывается моделями, содержащими до 6 млн переменных, и погрешность предсказания увеличивается каждые три дня. Это происходит от того, что детерминистические симметричные во времени законы соответствуют только весьма частным случаям и верны для устойчивых динамических классических и квантовых систем.

В дополнение к динамике нельзя не сказать и о химической необратимости. Неравновесные химические реакции могут приводить к необратимости и при определенных условиях могут стать началом новых типов эволюции систем.

Таковыми необратимыми процессами являются процессы распада ядер тяжелых металлов – радиоактивное излучение и существование нестабильных частиц. Согласно трудам Л. Больцмана, необратимость, присущая второму закону термодинамики, несовместима с обратимыми законами классической динамики.

Таким образом, можно констатировать словами Л. Больцмана [4], что «необратимость есть проявление в макроскопическом масштабе «стохастичности», существующей в микроскопическом масштабе». Каково же происхождение этой случайности, рассмотрим далее в данной статье.

Необратимость в описании систем на основе концепции второго начала термодинамики

Второй закон классической механики И. Ньютона оперирует фундаментальным уравнением (1687) [5], устанавливающим зависимость между силой F , массой m и ускорением ω :

$$m \omega = F, \quad (1)$$

в котором нет различия между прошлым $t \rightarrow -\infty$ и будущим $t \rightarrow +\infty$, т.е. уравнение (1) инвариантно относительно обращения времени.

Однако уже в девятнадцатом столетии Р. Клаузиус ввел в науку понятие «энтропия» (S – функция) для изолированных систем (1865) [6], которые не обмениваются с внешним миром ни энергией, ни веществом, монотонно возрастает до тех пор, пока не достигает своего максимального значения в состоянии термодинамического равновесия:

$$\frac{dS}{dt} \geq 0. \quad (2)$$

В дальнейшем оказалось, что соотношение (2) справедливо и для систем, обменивающихся с внешней средой и веществом, и энергией (второе начало термодинамики):

$$dS = d_e S + d_i S, \quad d_i S \geq 0, \quad (3)$$

где $d_e S$ – определяет перенос энтропии через границы системы, а $d_i S$ – производство энтропии внутри системы. И самое главное: вклад в производство энтропии внутри системы вносят только необратимые процессы.

Таким образом, второе начало термодинамики как фундаментальный закон устанавливает: необратимые процессы типа химических реакций, теплопроводности, диффузии и других (например, для детально описанных процессов СФСС [7–10]) приводят к росту энтропии и, следовательно, к односторонней направленности времени. Это можно сформулировать и по-другому: второе начало термодинамики: положительное направление времени второе начало термодинамики связывает с возрастанием энтропии.

Для замкнутых систем, которые обмениваются с внешним миром энергией, но не веществом, производство энтропии определяется теплом Q , получаемым от внешней среды:

$$d_e S = \frac{dQ}{T^0}, \quad d_i S \geq 0, \quad (4)$$

где T^0 – абсолютная температура.

При объединении первого начала термодинамики с соотношением (4) для замкнутой системы имеем

$$dE = dQ - p dV, \quad (5)$$

где E – энергия, p – давление, V – объем, т.е. энергия, которой система обменивается с внешним миром за небольшой промежуток времени dt , состоит из теплоты, получаемый системой, и механической работой, произведенной над границей системы.

Тогда полный дифференциал энтропии равен

$$dS = \frac{dE}{T^0} + p \frac{dV}{T^0}. \quad (6)$$

Дж. Гиббс в работе [11] обобщил соотношение (6) на случай неоднородного по составу тела:

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial E}\right) dE + \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right) dV + \sum_{\gamma} \left(\frac{\partial S}{\partial n_{\gamma}}\right) dn_{\gamma} = \frac{dE}{T^0} + \frac{p}{T^0} dV - \sum \frac{m_{\gamma}}{T^0} dn_{\gamma}, \quad (7)$$

где m_{γ} – химические потенциалы Дж. Гиббса.

Для случая линейной неравновесной термодинамики формула (6) допускает обобщение вида

$$dS = \sum_j X_j J_j, \quad (8)$$

где J_j – скорости различных необратимых процессов (химических реакций, тепловых потоков, диффузии и др.), протекающих в системе; X_j – соответствующие обобщающие силы (средства, градиенты температур, химических потенциалов и т.д.).

Следовательно, формула (8) является основной зависимостью макроскопической термодинамики необратимых процессов.

Из принятия второго начала термодинамики как фундаментального факта можно сделать в качестве выводов следующие следствия:

Следствие 1. Энергия мира постоянна. Энтропия мира возрастает.

Следствия 2. Производство энтропии порождает стрелу времени.

Следствия 3. Двойственный характер необратимых процессов. Производство энтропии создает как порядок, так и беспорядок.

Следствие 4. Вселенная появилась в результате необратимых процессов в квантовом вакууме.

Следствие 5. Проблема «пространство – время» в современной космологии может быть решена только с учетом необратимости и нарушения симметрии времени.

Здесь необходимо отметить заслуги отечественных и зарубежных ученых в развитии динамики и термодинамики, таких как: Р. Клаузиус, Л. Больцман, А. М. Ляпунов, В. И. Вернадский, Н. Н. Боголюбов, Б. Мистра, А. А. Власов, Н. Е. Крылов, М. А. Леонтович, И. Р. Пригожин, Ю. Л. Климонтович и др.

Статистическое описание необратимости в теории долговечности оборудования структурно и функционально сложных систем

В настоящее время в науке существует *две формулировки законов физики*: первая основана на использовании траектории или волновых функций, вторая – на теории ансамблей Гиббса и Эйнштейна. С динамической точки зрения вторая формулировка, будучи примененной к отдельным траекториям или волновым функциям, сводится к первой. Теперь переходим к *третьей* формулировке, имеющей совершенно иной статус: она применима только к ансамблю и справедлива только для хаотических систем. Она образует базис для синтеза, объединяющего свойства микромира и макромира поскольку вводит необратимость в фундаментальное описание систем.

Динамические системы подразделяются на устойчивые и неустойчивые, крайним случаем неустойчивых систем являются «хаотические системы», для которых описание в терминах траекторий становится недостаточным, поскольку траектории, первоначально сколь угодно близкие, со временем экспоненциально расходятся... Хаос также появляется при изучении макроскопических необратимых процессов... «Негативные» аспекты хаоса – невозможность определенных предсказаний вследствие экспоненциальной расходимости траекторий. Это соответствует «чувствительности к начальным условиям» – обычному определению хаоса. Это позитивные аспекты хаоса. Так как траектории становятся чрезмерной идеализацией, то приходится обратиться к вероятностному описанию в терминах ансамбля траекторий. Гиббс и Эйнштейн развили этот подход в статистической физике. Очень важное обстоятельство свидетельствует также о следующем:

1) вероятностное описание, вводимое для хаотических систем, несводимо, т.е. не применимо к отдельной траектории. Это строгий результат, полученный в ходе применения к анализу хаоса методов современного функционального анализа. В таком необратимом вероятностном описании прошлое и будущее играют разные роли;

- 2) хаос приводит к включению стрелы времени в фундаментальное динамическое описание;
- 3) хаос позволяет разрешить парадокс времени, но он делает и нечто больше: он привносит вероятность в классическую динамику как наиболее признанный прототип детерминистической науки. В данном контексте вероятность выступает не как порождение нашего незнания, а как неизбежное выражение хаоса.

Таким образом, хаос приводит к несводимому вероятностному описанию динамических систем. И как вывод: все системы, допускающие несводимое вероятностное описание, по определению считаются хаотическими. Такие системы допускают описание не в терминах отдельных траекторий (или волновых функций в квантовой механике), а только в терминах ансамблей траекторий. И, следовательно, у всех систем, соответствующих функциональному описанию природы в терминах взаимодействующих факторов, столь широкое обобщение понятия хаоса позволяет констатировать необходимость новой формулировки законов физики.

Для описания свойства необратимости широко используется язык операторов современного функционального анализа. Исторически широко применяются подходы классической и квантовой механики: оператор Лиувилля L (1809–1882 гг.) и Гамильтона H_{on} (1853 г.):

$$i \frac{\partial \rho}{\partial t} = L\rho \quad (9)$$

и

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = H_{on} \Psi, \quad (10)$$

где $i = \sqrt{-1}$, $\rho(q_1, \dots, q_s, p_1, \dots, p_s)$ – плотность точек в ансамбле частиц с координатами q и импульсами p , а величина $\rho dq_1, \dots, dq_s, dp_1, \dots, dp_s$ – вероятность нахождения представленных точек в момент времени t в элементе объема $dq_1, \dots, dq_s, dp_1, \dots, dp_s$ фазового пространства, \hbar – постоянная Планка, Ψ – волновая функция – амплитуда вероятности (квадрат ее модуля равен вероятности состояния).

Формальное решение уравнений (9) и (10) имеет вид уравнения Лиувилля (9):

$$\rho(t) = e^{-iLt} \rho(0) \quad (11)$$

и уравнения Шредингера (10):

$$\rho(t) = e^{-iHt} \rho(0) e^{iHt}. \quad (12)$$

Позднее в конце XIX – начале XX в., вместо функций координат и импульсов в динамическое описание системы были введены:

- 1) А. Пуанкаре – оператор микроскопической энтропии M ;
- 2) функции Ляпунова, разработанные в 1886–1902 гг.;
- 3) оператор времени T , введенный Б. Мистрой (1978) [12].

Кроме этого, для эргодических систем Б. Мистра в указанной работе доказал, что для существования оператора M необходимым условием является фактор перемешивания, а достаточным – наличие K -потока (КАМ-теория А. И. Колмогорова, В. И. Арнольда и Ю. К. Мозера) [13]. Суть этой теории: неинтегрируемость есть новый исходный путь для построения динамики. Согласно теории КАМ в природе наблюдаются два типа траектории: «хорошие» детерминистические траектории и «случайные» с резонансными, которые беспорядочно блуждают в областях фазового пространства. И в случае хаоса резонансы порождают необычайно сложное поведение системы в фазовом пространстве с экспоненциальным разбеганием первоначально близких траекторий и диффузией с последующими эффектами приближения к равновесному распределению точек в будущем, т.е. к нарушению временной симметрии.

Б. Мистра в работе [12] доказал, что в случае K -потока оператор энтропии L можно сопоставить такой сопряженный эрмитов оператор времени T , что их коммутатор равен константе

$$-i[L, T] = -i[LT - TL] = I, \quad (13)$$

где I – единичный оператор.

Так как оператор L формально соответствует производной по времени (9), то сопряженный оператор T соответствует «времени» в том смысле, что представление

$$L \rightarrow i \frac{\partial}{\partial t}, T \rightarrow t \tag{14}$$

удовлетворяет коммутационному соотношению (13), т.е. можно дополнить динамику оператором T , представляющим флуктуирующее время. В работе [1, с. 200] И. Р. Пригожин показал осуществимость перехода от динамического описания к вероятностному с помощью оператора преобразования Λ с помощью нового понятия времени, позволяющего рассчитывать «средний возраст» отдельных состояний системным оператором внутреннего времени T , который существенно отличается от обычного внешнего временного оператора t . С этой целью на базе зависимости (13) можно, используя оператор эволюции времени вида $U = e^{-iLt}$, который известен из уравнения (11) Лиувилля, получить соотношение с оператором T в виде

$$U_t^T T U_t = T + tI. \tag{15}$$

В работе [1] доказано, что физический смысл нового оператора внутреннего времени T – это нелокальный оператор, порождающий новое описание классической динамики для сильно неустойчивых систем.

Опуская промежуточные аналитические выкладки, И. Р. Пригожин строго доказал, что если оператор внутреннего времени существует, то каждому состоянию неустойчивой системы ρ будет соответствовать средний возраст $\langle T \rangle_\rho$ по формуле

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\langle \underline{\rho}, T \underline{\rho} \rangle}{\langle \underline{\rho}, \underline{\rho} \rangle}, \tag{16}$$

где каждая функция распределения системы ρ допускает разложение по собственным функциям $\{1, \varphi_{n,i}\}$: $\varphi_{n,i}$ – это полный набор собственных функций оператора внутреннего времени T ; индекс n – собственное значение оператора T ; индекс i – степень вырождения собственного значения n :

$$\rho = 1 + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n \varphi_n, \tag{17}$$

$\underline{\rho}$ – избыток ρ по сравнению с равномерным равновесным распределением

$$\underline{\rho} = \rho - 1 = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n \varphi_n. \tag{18}$$

Теперь, зная (18) и ортонормированность функции φ_n , можно преобразовать уравнение (16) к виду

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\sum n c_n^2}{\sum c_n^2} = \langle n \rangle. \tag{19}$$

Из уравнения (15) следует

$$\langle T \rangle_{\rho_t} = \langle T \rangle_{\rho_0} + t \tag{20}$$

и средний возраст состояния системы $\underline{\rho}$ «идет эквидистантно» с внутренним временем или временем t , отсчитываемым по обычным часам. При этом легко можно показать, что

$$d \langle \delta T^2 \rangle = 0, \tag{21}$$

где $\langle \delta T^2 \rangle = \langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2$, т.е. дисперсия внутреннего времени остается постоянной.

Из приведенных сведений следуют важные выводы:

1. Среднее значение «возраста» систем соответствует средним значениям ресурса, срока службы и их остаточным значениям как основным показателям долговечности СФСС.
2. Зная аналитические выражения реальных необратимых процессов, имеющих место быть при применении конструктивных элементов, блоков и подсистем по назначению и изменению их под количественным воздействием внутренних и внешних факторов на микроскопическом и макроскопическом уровнях (например, детально изложенным в работе [10] для таких сложных и чрезвычайно опасных объектов, как ядерные энергетические установки), появляется возможность более объективного оценивания показателей долговечности СФСС в соответствии с современными достижениями теории необратимых процессов динамических систем [8, 14–19].

Заключение и выводы

Одно из основных свойств теории надежности, безопасности и эффективности СФСС – долговечность. Это свойство неразрывно связано как со свойством «необратимость», так и со свойством «старение». Несмотря на обилие работ в области классической физики, динамики и термодинамики, на наш взгляд, понятия «старение» и «долговечность» в инженерных науках объективно дополняют друг друга. Мы очень близки к точке зрения И. Р. Пригожина, высказанной в работе [1, с. 173], что «тела состоят из атомов, которые бессмертны во времени, а меняется лишь отношение между атомами и молекулами». В этом смысле временная шкала старения характеризует свойство популяций, которые всегда состоят из индивидов.

Из содержания статьи следуют выводы:

1. Необратимость – объективная форма существования и устойчивых флуктуирующих динамических систем и играет важную конструктивную роль в процессах даже в совершенно различных областях науки, начиная с биологии и заканчивая космологией.
2. Необратимые процессы имеют свои закономерности на трех уровнях описания систем: субмикроскопическом, микроскопическом и макроскопическом. В конечном итоге такие микроскопические процессы, как химические реакции, диффузия, адсорбция, распад твердых растворов, изменение механических, электрических и магнитных свойств твердых тел и другие, являются причиной более сложных деградиационных макропроцессов: коррозия, эрозия, износ, ползучесть, усталость, деформации и др. Причем такого рода необратимые процессы развиваются под воздействием комплекса эксплуатационных факторов в СФСС: динамические и статические механические нагрузки, термогидравлические и тепловые удары, перенос и осаждение продуктов коррозии, примесей и т.д. Поэтому необратимые процессы приводят к глубоким изменениям на самом фундаментальном уровне описания природы – на уровне пространственно-временного континуума.
3. Энтропийное время всегда направлено в одну сторону и не совпадает с ходом времени, отсчитываемого по обычным часам, и поэтому всегда эволюционирует в модусах «прошлое–настоящее–будущее», причем существует множество типов эволюции времени.
4. С точки зрения решения динамических задач на статистическом уровне с помощью функции распределения состояния систем ρ исследование должно включать прежде всего спектральное представление операторов: эволюции Лиувилля, микроскопической энтропии, преобразования, внутреннего времени.
5. Важным вопросом является описание непрерывных во времени функций распределения, связанных с незатухающими взаимодействиями, что приводит к появлению сингулярных функций. А это свидетельствует о выходе исследования из гильбертова пространства с «хорошими» функциями и переходе к обобщенным пространствам типа пространства Гельфанда.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 18-47-860007, 18-07-00391).

Библиографический список

1. Пригожин, И. Р. От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках : пер. с англ. / И. Р. Пригожин ; под ред., с предисл. и послесл. Ю. Л. Климонтовича. – Изд. 2-е, доп. – Москва : Едиториал УРСС, 2002. – 288 с.
2. Пригожин, И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени : пер. с англ. / И. Пригожин, И. Стенгерс. – Изд. 5-е. – Москва : Едиториал УРСС, 2003. – 240 с.

3. Пригожин, И. Конец неопределенности. Время, хаос и новые законы природы / И. Пригожин. – Ижевск : Ижевская республиканская типография, 1999. – 216 с.
4. Больцман, Л. Избранные труды / Л. Больцман. – Москва : Наука, 1984.
5. Ньютон, И. Математические начала натуральной философии // В кн.: Крылов А. Н. Собрание трудов. Т. 7. – Москва – Ленинград : Изд-во АН СССР, 1936.
6. Храмов, Ю. А. Клаузиус Рудольф Юлиус Эмануэль (Clausius Rudolf Julius Emanuel) // Физики : Биографический справочник / под ред. А. И. Ахиезера. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Москва : Наука, 1983. – 400 с.
7. Острейковский, В. А. Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций / В. А. Острейковский. – Москва : Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.
8. Острейковский, В. А. Математическое моделирование эффекта асимметрии внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных критически важных систем / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Итоги науки. Выпуск 37 : избр. тр. междунар. симп. по фундаментальным и прикладным проблемам науки. – Москва : РАН, 2018. – С. 69–111.
9. Острейковский, В. А. Необратимость процессов как важнейшее свойство модусов внутреннего времени сложных систем / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Региональная информатика (РИ – 2018). XV Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ – 2018)» (Санкт-Петербург, 24–26 октября 2018 г.) : материалы конф. СПОИСУ. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 252–254.
10. Антонов, А. В. Ресурс и срок службы оборудования энергоблоков атомных станций (на примере энергоблоков Смоленской АЭС) / В. А. Антонов, В. А. Острейковский. – Москва : Инновационное машиностроение, 2017. – 536 с.
11. Гиббс, Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика. – Москва : Наука, 1982.
12. Terrell, L. H. Interacting enzyme systems at steady state: Location of the phase / L. H. Terrell, Chen Yi-Der // J. Chemistry Proc. Nati. Acad. Sci. USA. – 1978. – Vol. 75, № 7. – P. 3015–3018.
13. Колмогоров, А. Н. Об аналитических методах в теории вероятностей / А. Н. Колмогоров // Успехи математических наук. – 1938. – Вып. 5. – С. 5–41.
14. Острейковский, В. А. Феномен асимметрии времени в теории неустойчивых и необратимых процессов сложных динамических систем : монография / В. А. Острейковский. – Сургут : Печатный мир, 2017. – 268 с.
15. Острейковский, В. А. Операторы энтропии, преобразования и внутреннего времени в теории долговечности сложных систем / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Фундаментальные и прикладные проблемы науки : материалы XIV Междунар. симп. – Москва : РАН, 2019. – С. 91–98.
16. Острейковский, В. А. Феномен асимметрии внутреннего времени с учетом неустойчивости и необратимости процессов в теории прогнозирования состояния сложных динамических систем / В. А. Острейковский, С. А. Лысенкова, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1 (25). – С. 3–10.
17. Острейковский, В. А. О возможности использования эффекта асимметрии времени в задачах оценки долговечности сложных технических систем / В. А. Острейковский, С. А. Лысенкова, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1. – С. 21–34.
18. Особенности разработки макромоделей надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 101–102.
19. Лысенко, А. В. Методика проведения испытаний для определения динамических характеристик БРЭА / А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, В. А. Трусов, И. И. Кочегаров // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 106–108.

References

1. Prigozhin I. R. *Ot sushchestvuyushchego k voznikayushchemu: vremya i slozhnost' v fizicheskikh naukakh: per. s angl.* [From existing to emerging: time and complexity in the physical Sciences: translated from English]. 2nd ed., rev. Moscow: Editorial URSS, 2002, 288 p. [In Russian]
2. Prigozhin I., Stengers I. *Vremya, khaos, kvant. K resheniyu paradoksa vremeni: per. s angl.* [Time, chaos, quantum. To solve the time paradox: translated from English]. 5th ed. Moscow: Editorial URSS, 2003, 240 p. [In Russian]
3. Prigozhin I. *Konets neopredelennosti. Vremya, khaos i novye zakony prirody* [End of uncertainty. Time, chaos and new laws of nature]. Izhevsk: Izhevskaya republikanskaya tipografiya, 1999, 216 p. [In Russian]
4. Bol'tsman L. *Izbrannye trudy* [Selected works]. Moscow: Nauka, 1984. [In Russian]
5. N'yuton I. *Krylov A. N. Sbranie trudov* [Krylov A. N. Collection of works]. Vol. 7. Moscow – Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1936. [In Russian]
6. Khramov Yu. A. *Fiziki: Biograficheskiy spravochnik* [Physics : a Biographical dictionary]. Izd. 2nd ed., suppl. and rev. Moscow: Nauka, 1983, 400 p. [In Russian]

7. Ostreykovskiy V. A. *Starenie i prognozirovaniye resursa oborudovaniya atomnykh stantsiy* [Aging and the prediction of the service life of nuclear power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1994, 288 p. [In Russian]
8. Ostreykovskiy V. A., Shevchenko E. N. *Itogi nauki. Vypusk 37: izbr. tr. mezhdunar. simp. po fundamental'nyim i prikladnym problemam nauki* [Results of science. Issue 37: selected proceedings of the international Symposium on fundamental and applied problems of science]. Moscow: RAN, 2018, pp. 69–111. [In Russian]
9. Ostreykovskiy V. A., Shevchenko E. N. *Regional'naya informatika (RI – 2018). XV Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya «Regional'naya informatika (RI – 2018)». Sankt-Peterburg, 24–26 oktyabrya 2018 g.: materialy konferentsii. SPOISU* [Regional Informatics (RI – 2018). XV St. Petersburg international conference " Regional Informatics (RI – 2018)". Saint-Petersburg, October 24–26, 2018 : proceedings of the conference. SPOIS]. Saint-Petersburg, 2018, pp. 252–254. [In Russian]
10. Antonov A. V., Ostreykovskiy V. A. *Resurs i srok sluzhby oborudovaniya energoblokov atomnykh stantsiy (na primere energoblokov Smolenskoj AES)* [Resource and service life of equipment for nuclear power plants (on the example of Smolensk NPP power units)]. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017, 536 p. [In Russian]
11. Gibbs Dzh. V. *Termodinamika. Statisticheskaya mekhanika* [Thermodynamics. Statistical mechanics]. Moscow: Nauka, 1982. [In Russian]
12. Terrell L. H., Chen Yi-Der *J. Chemistry Proc. Nati. Acad. Sci. USA*. 1978, vol. 75, no. 7, pp. 3015–3018.
13. Kolmogorov A. N. *Uspekhi matematicheskikh nauk* [Advances in mathematical sciences]. 1938, iss. 5, pp. 5–41. [In Russian]
14. Ostreykovskiy V. A. *Fenomen asimmetrii vremeni v teorii neustoychivyykh i neobratimyykh protsessov slozhnykh dinamicheskikh sistem: monografiya* [The phenomenon of time asymmetry in the theory of unstable and irreversible processes of complex dynamical systems: monograph]. Surgut: Pechatnyy mir, 2017, 268 p. [In Russian]
15. Ostreykovskiy V. A., Shevchenko E. N. *Fundamental'nye i prikladnye problemy nauki: materialy XIV Mezhdunar. simp.* [Fundamental and applied problems of science: proceedings of the XIV international Symposium]. Moscow: RAN, 2019, pp. 91–98. [In Russian]
16. Ostreykovskiy V. A., Lysenkova S. A., Shevchenko E. N. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 1 (25), pp. 3–10. [In Russian]
17. Ostreykovskiy V. A., Lysenkova S. A., Shevchenko E. N. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 1, pp. 21–34. [In Russian]
18. Yurkov N. K., Zatylnkin A. V., Poleskiy S. N., Ivanov I. A., Lysenko A. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and Quality]. 2014, vol. 1, pp. 101–102. [In Russian]
19. Lysenko A. V., Tan'kov G. V., Trusov V. A., Kochegarov I. I. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 2, pp. 106–108. [In Russian]

Острейковский Владислав Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: ova@surgu.ru

Шевченко Елена Николаевна

кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: elenan_27@mail.ru

Ostreykovsky Vladislav Alekseevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of computer science,
Surgut State University
(1 Lenin street, Surgut, Russia)

Shevchenko Elena Nikolaevna

candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
sub-department of computer science,
Surgut State University
(1 Lenin street, Surgut, Russia)

Образец цитирования:

Острейковский, В. А. Об учете свойства необратимости процессов в задачах оценки долговечности структурно и функционально сложных систем / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 37–45. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-5.