

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 62-97-98

DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-1

И. Е. Старостин

ПОЛУЧЕНИЕ МОДЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНО-ПОТОКОВЫХ УРАВНЕНИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭТИХ ОБЪЕКТАХ

I. E. Starostin

OBTAIING RELIABILITY MODELS OF TECHNICAL OBJECTS FROM POTENTIAL-STREAMING EQUATIONS OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES IN THESE OBJECTS

Аннотация. *Актуальность и цели.* При проектировании и создании оригинальных технических объектов, в том числе и компонентов авиационных систем, встает вопрос о надежности и безопасности их эксплуатации. Функционирование технических систем осуществляется протеканием физико-химических процессов в них. Для моделирования этих процессов автором был разработан в рамках современной неравновесной термодинамики потенциально-потокосый метод – единый подход математического описания и моделирования процессов различной физической и химической природы. Целью настоящей работы является разработка моделей для анализа надежности и безопасности технических объектов из уравнений физико-химических процессов в них. *Материалы и методы.* Ранее автором было показано, что, исключив из уравнений потенциально-потокосого метода неизвестные переменные величины и неизвестные постоянные коэффициенты, мы получим диагностические и прогностические модели технических объектов с точностью до данных, получаемых из испытания этих объектов и лабораторных систем. Описанное исключение величин из уравнений потенциально-потокосого метода в общем случае целесообразно осуществлять методами глубокого машинного обучения. Проведя испытания этих технических объектов и лабораторных систем,

Abstract. *Background.* When designing and creating original technical objects, including components of aviation systems, the question arises of the reliability and safety of their operation. The functioning of technical systems is carried out by the course of physical and chemical processes in them. To model these processes, the author developed a potential-flow method within the framework of modern nonequilibrium thermodynamics – a unified approach to the mathematical description and modeling of processes of various physical and chemical nature. The aim of this work is to develop models for analyzing the reliability and safety of technical objects from the equations of physical and chemical processes in them. *Materials and methods.* Earlier, the author showed that by eliminating unknown variables and unknown constant coefficients from the equations of the potential-flow method, we obtain diagnostic and prognostic models of technical objects accurate to the data obtained from testing these objects and laboratory systems. The described exclusion of quantities from the equations of the potential-streaming method in the general case, it is advisable to carry out deep machine learning methods. Having tested these technical objects and laboratory systems, substituting the obtained test results in these diagnostic and prognostic models, we obtain models for solving various practical problems, including the tasks of ensuring the re-

© Старостин И. Е., 2020

подставив полученные результаты испытаний в эти диагностические и прогностические модели, мы получаем модели для решения различных практических задач, в том числе задач обеспечения надежности и безопасности эксплуатации технических объектов. *Результаты и выводы.* На основе описанных методов в настоящей работе представляется алгоритм получения моделей надежности технических объектов из информации о физико-химических процессах в этих объектах. Результаты работы позволяют планировать и проводить испытания конкретных технических объектов с последующим анализом надежности и безопасности эксплуатации этих объектов и дальнейшей разработкой методики повышения показателей надежности и безопасности эксплуатации рассматриваемых технических объектов. Этот анализ проводится с использованием моделей надежности, полученных из уравнений (потенциально-поточковых) физико-химических процессов этих объектов, что гарантирует адекватность этих моделей для различных режимов работы этих объектов (в том числе и для тех, для которых не проводились испытания этих объектов), так как потенциально-поточковый метод – единый подход описания физико-химических процессов различной природы, то рассматриваемая методология также представляет собой единый подход получения математических моделей сложных технических объектов различной природы. Этот подход позволяет разрабатывать сложные технические объекты повышенной надежности и повышенной безопасности эксплуатации.

Ключевые слова: технические объекты, надежность и безопасность эксплуатации, потенциально-поточковый метод, математическое моделирование.

liability and safety of operation of technical objects. *Results.* Based on the described methods, the present paper presents an algorithm for obtaining the reliability models of technical objects from information on the physicochemical processes in these objects. *Conclusions.* The results of the work make it possible to plan and carry out tests of specific technical objects with the subsequent analysis of the reliability and safety of operation of these objects and the further development of a methodology to increase the reliability and safety indicators of operation of the considered technical objects. This analysis is carried out using reliability models obtained from the equations (potential-flow) of the physicochemical processes of these objects, which guarantees the adequacy of these models for various operating modes of these objects (including those for which these objects have not been tested). Because Since the potential-flow method is a unified approach to the description of physical and chemical processes of various nature, the methodology under consideration also represents a single approach to obtaining mathematical models of complex technical objects of various nature. This approach allows the development of complex technical objects with increased reliability and increased operational safety.

Keywords: technical objects, reliability and safety of operation, potential-stream method, mathematical modeling.

Введение

В процессе проектирования и создания новых технических объектов принципиальная роль отводится обеспечению надежности и безопасности их эксплуатации [1]. Как известно, функционирование технических объектов, проведение технологических операций определяются протеканием физико-химических процессов в этих системах [2].

Для описания и математического моделирования физико-химических процессов в общем случае автором был разработан в рамках современной неравновесной термодинамики [3–5] потенциально-поточковый метод – единый подход моделирования физико-химических систем (в том числе и сложных), в которых протекают процессы различной физической и химической природы [2, 6–9]. В соответствии с этим методом на основе факторов, определяющих динамику физико-химических процессов (рис. 1) [2–10] синтезируется система уравнений динамики этих процессов в соответствии с формализмом, изложенным в работе [6], которая затем дополняется уравнениями для выходных характеристик системы [10–12]. Часть этих выходных характеристик рассматриваемой системы входит в ее критерии работоспособности [1].

Для получения из этих уравнений в численном виде динамики физико-химических процессов необходима информация о свойствах веществ и процессов в этой системе, получаемая из экспериментальных данных [10]. Затем из полученной потенциально-поточковым методом системы уравнений динамики физико-химических процессов численно-аналитическими методами исключаются динамические координаты (координаты состояния, однозначно определяющие состояние системы в любой текущий момент времени независимо от ее предыстории [2–4, 6]), ее индивидуальные параметры, неизвестные внешние воздействия на нее, а также частично коэффициенты, входящие

в функциональные разложения свойств веществ и процессов [9–12]. Затем, учтя полученную из экспериментальных данных информацию о свойствах веществ и процессов, мы получим связь одних выходных характеристик с другими (наблюдаемыми) [10–12]. В частности, связь выходных характеристик, входящих в критерии работоспособности технического объекта (которые в большинстве случаев ненаблюдаемые [1]) с наблюдаемыми выходными характеристиками этого объекта. Имея такую связь, сделать выводы о работоспособности этого объекта [1], а также, используя дополнительно методы теории вероятности, определить вероятность безотказной работы объекта [1].



Рис. 1. Факторы, определяющие динамику физико-химических процессов

Таким образом, из системы уравнений физико-химических процессов, полученной потенциально-поточным методом для произвольной системы, в которой эти процессы протекают, возможно получить математические модели для анализа надежности этой системы. Настоящая статья посвящена получению из системы уравнений потенциально-поточного метода этих математических моделей надежности системы.

Диагностические и прогностические модели технических объектов

Итак, исключив из потенциально-поточных уравнений вышеописанные величины и учтя информацию о коэффициентах функциональных разложений свойств веществ и процессов, полученную из эксперимента, мы получим связь наблюдаемых выходных характеристик рассматриваемой системы в последующие моменты времени с этими наблюдаемыми характеристиками в текущий и предыдущий моменты времени (прогностическая модель) [10–12]:

$$\mathbf{v}_z(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}_z(t), \mathbf{x}_s(t), \mathbf{q}) + \mathbf{e}_z(t), \quad (1)$$

где $\mathbf{v}_z(t)$ – старшие производные наблюдаемых характеристик $\mathbf{z}(t)$; $\mathbf{x}_z(t)$ – наблюдаемые характеристики $\mathbf{z}(t)$ и их младшие производные; $\mathbf{x}_s(t)$ – известные внешние воздействия $\mathbf{s}(t)$ и их производные; \mathbf{q} – параметры, получаемые из результатов испытаний рассматриваемой системы; $\mathbf{e}_z(t)$ – составляющие шума. Связь ненаблюдаемых выходных характеристик рассматриваемой системы в текущий момент времени с ее наблюдаемыми характеристиками в текущий и предыдущий моменты времени (диагностическая модель) [10–12]:

$$\mathbf{v}_y(t) = \mathbf{g}(\mathbf{x}_y(t), \mathbf{x}_z(t), \mathbf{x}_s(t), \mathbf{q}) + \mathbf{e}_y(t), \quad \mathbf{x}_y(t_0) = \tilde{\mathbf{g}}(\mathbf{x}_z(t_0), \mathbf{x}_s(t_0), \mathbf{q}) + \mathbf{e}_y, \quad (2)$$

где $\mathbf{v}_y(t)$ – старшие производные ненаблюдаемых характеристик $\mathbf{y}(t)$ рассматриваемой системы; $\mathbf{x}_y(t)$ – ненаблюдаемые выходные характеристики $\mathbf{y}(t)$ и их младшие производные; $\mathbf{e}_y(t)$ – со-

ставляющие шума. Производные по времени выходных характеристик системы, входящие в формулы (1) и (2), могут быть как непрерывными производными, так и дискретными (разделенными разностями [13]).

Имея диагностические и прогностические модели (1) и (2), выполнив испытания рассматриваемого экземпляра, получив результаты из испытаний этого экземпляра параметра \mathbf{q} , возможно получить динамику его выходных характеристик (наблюдаемых и ненаблюдаемых), среди которых находятся характеристики, входящие в критерии работоспособности рассматриваемой системы [1]. Эти модели в силу сложности системы потенциально-поточковых уравнений [2–4, 6, 9, 11] получаются численно-аналитическими методами Монте-Карло путем случайного задания значений [11]:

- коэффициентов функциональных разложений свойств веществ и процессов [9, 10];
- индивидуальных параметров системы [10];
- начального состояния системы;
- неизвестных внешних воздействий на нее;

а также дальнейшего расчета соответствующих этим заданным величинам динамик выходных характеристик системы (и их производных) и затем аппроксимации зависимостей (1) и (2).

Эта аппроксимация может быть выполнена:

- классическими методами аппроксимации [13];
- классическими методами машинного обучения [14, 15] (являющиеся дальнейшим развитием классических методов идентификации [16]);
- методами глубокого машинного обучения (в частности, с использованием нейронных сетей [17–20], методами символьной регрессии [21–24]).

Так как в силу сложности физико-химических процессов в общем случае невозможно заранее предсказать, в каком классе моделей следует искать зависимости (1) и (2), то для получения этих зависимостей следует использовать методы глубокого машинного обучения [17–24] (так как классические методы подразумевают знание классов, в которых ищутся эти зависимости (1) и (2) [13–16]).

Учет медленно протекающих деградиционных физико-химических процессов

Для упрощения получения диагностических и прогностических моделей (1) и (2) рассматриваемой системы потенциально-поточковые уравнения динамики физико-химических процессов в ней упрощаются методами, описанными в работе [8]. Частным случаем такого упрощения [8] является разделение физико-химических процессов в рассматриваемой системе на медленно протекающие и быстро протекающие процессы [8]. На относительно небольших промежутках времени координаты состояния, изменяющиеся в результате медленно протекающих процессов фиксируются («замораживаются»), и все описание этих медленно протекающих процессов из системы уравнений физико-химических процессов убирается. Затем из этой упрощенной системы потенциально-поточковых уравнений описанным выше способом (путем исключения вышеописанных величин численно-аналитическими методами Монте-Карло) получаются диагностические и прогностические модели:

$$\mathbf{v}_z(t) = \bar{\mathbf{f}}(\mathbf{x}_z(t), \mathbf{x}_s(t), \bar{\mathbf{q}}, \mathbf{r}(t)) + \mathbf{e}_z(t), \tag{3}$$

$$\mathbf{v}_y(t) = \bar{\mathbf{g}}(\mathbf{x}_y(t), \mathbf{x}_z(t), \mathbf{x}_s(t), \bar{\mathbf{q}}, \mathbf{r}(t)) + \mathbf{e}_y(t), \quad \mathbf{x}_y(t_0) = \bar{\bar{\mathbf{g}}}(\mathbf{x}_z(t_0), \mathbf{x}_s(t_0), \bar{\mathbf{q}}, \mathbf{r}(t_0)) + \mathbf{e}_y, \tag{4}$$

где $\mathbf{r}(t)$ – параметры, получаемые из результатов периодических испытаний рассматриваемой системы; эти параметры $\mathbf{r}(t)$ квазистационарные; $\bar{\mathbf{q}}$ – параметры, получаемые из испытаний рассматриваемой системы в начале ее эксплуатации. Прогностические и диагностические модели (3) и (4) аналогичны моделям (1) и (2) соответственно.

Прогностическая модель для квазистационарных параметров $\mathbf{r}(t)$, аналогичная (1):

$$\mathbf{v}_r(t) = \mathbf{f}^*(\mathbf{x}_r(t), \mathbf{p}_s(t), \bar{\mathbf{q}}) + \mathbf{e}_r(t), \tag{5}$$

где $\mathbf{v}_r(t)$ – старшие производные (разделенные разности) параметров $\mathbf{r}(t)$ рассматриваемой системы; $\mathbf{x}_r(t)$ – параметры $\mathbf{r}(t)$ и их младшие производные (разделенные разности); $\mathbf{p}_s(t)$ – характе-

ристики известных внешних воздействий $s(t)$, меняющиеся во времени существенно медленнее, чем эти воздействия $s(t)$; $e_r(t)$ – составляющие шума. Эта модель (5) получается численно-аналитическими методами Монте-Карло аналогично модели (1); для получения (5) необходимо моделировать как быстро, так и медленно протекающие процессы, используя в общем случае методы упрощения, описанные в работе [8].

Следует также отметить, что модели (3) и (4) (как и модели (1) и (2)) и модель (5) формируются для различных временных шкал. Прогностическая модель (5) может быть использована для выбора временных промежутков между периодическим техническим обслуживанием рассматриваемой системы, а также (наряду с моделями (3) и (4)) для выбора наиболее оптимальных режимов эксплуатации этой системы. Прогностические и диагностические модели (3) и (4) могут быть использованы для синтеза системы управления, выбора режима эксплуатации системы, ее диагностики.

В число ненаблюдаемых выходных характеристик системы $y(t)$ в общем случае входят как быстро меняющиеся характеристики (ненаблюдаемые) системы, так и медленно меняющиеся ненаблюдаемые характеристики рассматриваемой системы.

Получение вероятностных моделей технических объектов

Как нетрудно видеть из формул (3)–(5), для получения прогностических и диагностических моделей произвольной рассматриваемой системы (технического объекта) необходимы контрольные испытания этого объекта (входные и периодические). Из этих контрольных испытаний и определяются параметры $r(t)$ и \bar{q} , входящие в модели (3)–(5).

Однако в общем случае не всегда имеется возможность провести эти контрольные испытания. Более того, эти контрольные испытания должны быть неразрушающими (т.е. не выводящими испытываемый объект из строя). Однако могут быть случаи, когда из особенностей протекания физико-химических процессов в рассматриваемом объекте возможно получить лишь модели (3)–(5), принимающие на вход результаты разрушающих испытаний этих объектов. В описанных случаях возможно получить лишь из таких прогностических и диагностических моделей (3)–(5) вероятностные модели, используя статистику испытаний экземпляров рассматриваемой модели системы. Для решения этой задачи используются методы теории вероятностей, теории случайных процессов [25–27], а также методы Монте-Карло [25].

В соответствие с этими методами, используя статистику испытаний экземпляров рассматриваемой модели технического объекта, мы получим статистику параметров $r(t)$ и \bar{q} , входящих в модели (3)–(5). Затем, подставив каждую совокупность этих параметров $r(t)$ и \bar{q} в модель (3)–(5), получим статистику этих диагностических и прогностических моделей для каждого экземпляра рассматриваемой модели технического объекта. Из этой статистики моделей мы получим статистику соответствующих динамик выходных характеристик, а из этой статистики динамик выходных характеристик, используя определения вероятности, мы получим вероятностные характеристики рассматриваемой системы [14, 25], а затем методами теории вероятностей и теории случайных процессов связь между ними [14, 25–27]. Отсюда и получают вероятностные модели рассматриваемой системы [14, 25].

Получение показателей надежности

В общем случае критерии работоспособности системы имеют вид [1]

$$x_1^{(\min)} \leq x_1(t) \leq x_1^{(\max)}, x_2(t) \leq x_2^{(\max)}, x_3^{(\min)} \leq x_3(t). \quad (6)$$

Величинами x (с индексами) могут быть как наблюдаемые выходные характеристики $z(t)$, так и ненаблюдаемые выходные характеристики $y(t)$. Из этих критериев работоспособности (6) путем использования логических операций мы получаем более сложные критерии работоспособности [1]. Имея критерии работоспособности (6), а также прогностические и диагностические модели (3) и (4), мы можем спрогнозировать работоспособность системы [1], а также получить ее показатели надежности [1] (например, время безотказной работы).

Однако, как отмечалось выше, далеко не всегда из испытаний конкретного экземпляра технического объекта можно получить параметры $\mathbf{r}(t)$ и $\bar{\mathbf{q}}$. Отсюда из прогностических и диагностических моделей (3)–(5) мы описанным выше способом с использованием методов Монте-Карло [25], методов теории вероятностей и теории случайных процессов получаем вероятностные модели (имея статистику испытаний технических объектов (контрольных), из которой и получаем статистику этих параметров $\mathbf{r}(t)$ и $\bar{\mathbf{q}}$) [14, 26, 27]. Используя прогностические и диагностические модели (3)–(5), а также определения критериев работоспособности (6), мы получим описанным выше способом (с использованием методов Монте-Карло [25]) вероятностные характеристики надежности (например, вероятность безотказной работы в течение заданного промежутка времени) [1].

Заключение

Таким образом, для получения надежностных характеристик произвольного рассматриваемого технического объекта необходимо потенциально-потокосым методом синтезировать систему уравнений физико-химических процессов в этом объекте (в соответствии с изложенным в работе [6] формализмом). Затем, исключив (численно-аналитическими методами Монте-Карло [11]) из этой системы уравнений координаты состояния, индивидуальные параметры, неизвестные внешние воздействия, а также частично (с учетом результатов испытаний лабораторных систем [11, 12]) коэффициенты функциональных разложений свойств веществ и процессов, получим прогностические и диагностические модели (3)–(5) [11, 12]. Затем из этих моделей, используя критерии работоспособности (6), получаем характеристики надежности (в общем случае используя статистику параметров $\mathbf{r}(t)$ и $\bar{\mathbf{q}}$ для различных экземпляров рассматриваемой модели технического объекта).

Также по диагностическим и прогностическим моделям (3)–(5) и критериям работоспособности (6) можно прогнозировать (в общем случае с некоторой вероятностью) работоспособность конкретного экземпляра рассматриваемого технического объекта.

Отсюда роль моделирования физико-химических процессов (потенциально-потокосым методом) в рассматриваемом техническом объекте (для задач анализа надежности и безопасности эксплуатации) сводится к исключению из системы потенциально-потокосых уравнений вышеописанных величин и получению диагностических и прогностических моделей (3)–(5) этого объекта. В случае протекания в рассматриваемом объекте механических движений электромагнитных процессов потенциально-потокосые уравнения дополняются соответствующими уравнениями.

Библиографический список

1. Колодежный, Л. П. Надежность и техническая диагностика : учебник для вузов / Л. П. Колодежный, А. В. Чернодаров. – Москва : ВУНЦ ВВС ВВА им. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, 2010. – 452 с.
2. Старостин, И. Е. Программная реализация методов современной неравновесной термодинамики и система симуляции физико-химических процессов SimulationNonEqProcSS v.0.1.0 : монография / И. Е. Старостин, А. Г. Степанкин. – Бо Бассен, Маврикий : Lambert academic publishing, 2019. – 127 с.
3. Эткин, В. А. Энергодинамика: синтез теорий переноса и преобразования энергии : монография / В. А. Эткин. – Санкт-Петербург : Наука, 2008. – 409 с.
4. Жоу, Д. Расширенная необратимая термодинамика : монография / Д. Жоу, Х. Касас-Баскес, Дж. Лебон. – Москва ; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» ; Институт компьютерных исследований, 2006. – 528 с.
5. Полак, Л. С. Неравновесная химическая кинетика и ее применение : монография / Л. С. Полак. – Москва : Наука, 1979. – 248 с.
6. Starostin, I. E. Kinetic theorem of modern non-equilibrium thermodynamic : monograph / I. E. Starostin, V. I. Vukov. – Raleigh (North Carolina, USA) : Open Science Publishing, 2017. – 229 p.
7. Старостин, И. Е. Алгоритм численного интегрирования потенциально-потокосых уравнений в сосредоточенных параметрах с контролем корректности приближенного решения / И. Е. Старостин // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 479–493.
8. Старостин, И. Е. Упрощение потенциально-потокосых уравнений динамики физико-химических процессов для получения математической модели системы / И. Е. Старостин, С. П. Халютин, В. И. Быков // Сложные системы. – 2019. – № 3 (32). – С. 82–97.
9. Старостин, И. Е. Задание функций состояния для величин, входящих в формализм потенциально-потокосого метода описания динамики физико-химических процессов / И. Е. Старостин // Инновационные информационные и коммуникационные технологии : материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. – Москва : Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2019. – С. 317–322.

10. Starostin, I. E. Obtaining robotic objects model from the equations of the potential-flow method / I. E. Starostin, S. P. Khalutin // 20th international conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2019. – Novosibirsk : Publishing NSTU, 2019. – P. 678–684.
11. Старостин, И. Е. Методика получения математической модели эксплуатируемого объекта из потенциально-потокowych уравнений физико-химических процессов / И. Е. Старостин // Научные горизонты. – 2019. – № 10 (26). – С. 197–206.
12. Старостин, И. Е. К вопросу программной реализации методики получения математической модели эксплуатируемого объекта из потенциально-потокowych уравнений физико-химических процессов / И. Е. Старостин // Научные горизонты. – 2019. – № 11 (27). – С. 214–230.
13. Калиткин, Н. Н. Численные методы : учебник для вузов / Н. Н. Калиткин. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. – 592 с.
14. Flach, P. Machine Learning. The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data : monograph / P. Flach. – Cambridge : Cambridge University Press, 2015. – 400 p.
15. Brink, H. Real Word. Machine Learning : monograph / H. Brink, J. W. Richards, M. Fetherolf. – Shelter Island, New York, USA : Manning Publications, 2017. – 338 p.
16. Eykhoff, P. Systems identification: parametrs and state estimation : monograph / P. Eykhoff. – Eindhoven, Netherlands : University of technology, 1975. – 680 p.
17. Haykin, S. Neural Networks. A Comprehensive Foundation : university textbook / S. Haykin. – Upper Saddle River, USA : Prentice hall, 2006. – 1105 p.
18. Пюкке, Г. А. Применение нейросетевого подхода при построении моделей анализа систем высокой размерности / Г. А. Пюкке, Д. С. Стрельников // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2013. – № 24. – С. 21–28.
19. Козлова, Л. Е. Разработка и исследование систем замкнутого асинхронного электропривода по схеме ТРН-АД с нейросетевым наблюдателем скорости / Л. Е. Козлова // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – С. 44–50.
20. Калистратов, Т. А. Методы и алгоритмы создания структуры нейронной сети в контексте универсальной аппроксимации функций / Т. А. Калистратов // Вестник Томского государственного университета. – 2019. – Т. 19, вып. 6. – С. 1845–1848.
21. Дивеев, А. И. Вариационные методы символьной регрессии для задач управления и идентификации / А. И. Дивеев // Идентификация систем и задачи управления : тр. X Междунар. конф. (Москва, 26–29 января, 2015 г.). – Москва, 2015. – С. 141–148.
22. Дивеев, А. И. Свойства суперпозиции функций для численных методов символьной регрессии / А. И. Дивеев // Cloud of Science. – 2016. – Т. 3, № 2. – С. 290–301.
23. Данг, Тхи Фук. Решение задач идентификации математических моделей объектов и процессов методом символьной регрессии / Тхи Фук Данг, А. И. Дивеев, Е. А. Софронова // Cloud of Science. – 2018. – Т. 5, № 1. – С. 147–162.
24. Дивеев, А. И. Метод бинарного генетического программирования для поиска математического выражения / А. И. Дивеев, Е. М. Ломакова // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер.: Инженерные исследования. – 2017. – Т. 18, № 1. – С. 125–134.
25. Антонов, А. В. Системный анализ : учебник для вузов / А. В. Антонов. – Москва : Высш. шк., 2004. – 454 с.
26. Теория вероятностей : учебник для вузов / А. В. Печинкин [и др.]. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 456 с.
27. Волков, И. К. Случайные процессы : учебник для вузов / И. К. Волков, С. М. Зуев, Г. М. Цветкова. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 448 с.

References

1. Kolodezhnyy L. P., Chernodarov A. V. *Nadezhnost' i tekhnicheskaya diagnostika: uchebnik dlya vuzov* [Reliability and technical diagnostics: textbook for universities]. Moscow: VUNTs VVS VVA im. N. E. Zhukovskogo i Yu. A. Gagarina, 2010, 452 p. [In Russian]
2. Starostin I. E., Stepankin A. G. *Programmnyaya realizatsiya metodov sovremennoy neravnovesnoy termodinamiki i sistema simulyatsii fiziko-khimicheskikh protsessov SimulationNonEqProcSS v.0.1.0: monografiya* [Software implementation of methods of modern non-equilibrium thermodynamics and a system for simulating physical and chemical processes SimulationNonEqProcSS V. 0. 1 . 0: monograph]. Bo Bassen, Mavrikiy: Lambert academic publishing, 2019, 127 p. [In Russian]
3. Etkin V. A. *Energodinamika: sintez teoriy perenosa i preobrazovaniya energii: monografiya* [Energy dynamics: synthesis of theories of energy transfer and transformation: monograph]. Saint-Petersburg: Nauka, 2008, 409 p. [In Russian]
4. Zhou D., Kasas-Baskes Kh., Lebon Dzh. *Rasshirennaya neobratimaya termodinamika: monografiya* [Extended irreversible thermodynamics: monograph]. Moscow; Izhevsk: NITs «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika»; Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2006, 528 p. [In Russian]

5. Polak L. S. *Neravnovesnaya khimicheskaya kinetika i ee primeneniye: monografiya* [Non-equilibrium chemical kinetics and its application: monograph]. Moscow: Nauka, 1979, 248 p. [In Russian]
6. Starostin I. E., Bykov V. I. *Kinetic theorem of modern non-equilibrium thermodynamic: monograph*. Raleigh (North Carolina, USA): Open Science Publishing, 2017, 229 p.
7. Starostin I. E. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovaniye* [Computer research and modeling]. 2014, vol. 6, no. 4, pp. 479–493. [In Russian]
8. Starostin I. E., Khalyutin S. P., Bykov V. I. *Slozhnye sistemy* [Complex system]. 2019, no. 3 (32), pp. 82–97. [In Russian]
9. Starostin I. E. *Innovatsionnye informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii: materialy XVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Innovative information and communication technologies: proceedings of the XVI international scientific-practical conf.]. Moscow: Assotsiatsiya vypusnikov i sotrudnikov VVIA im. prof. N. E. Zhukovskogo, 2019, pp. 317–322. [In Russian]
10. Starostin I. E., Khalutin S. P. *20th international conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2019*. Novosibirsk: Publishing NSTU, 2019, pp. 678–684.
11. Starostin I. E. *Nauchnye gorizonty* [Scientific horizons]. 2019, no. 10 (26), pp. 197–206. [In Russian]
12. Starostin I. E. *Nauchnye gorizonty* [Scientific horizons]. 2019, no. 11 (27), pp. 214–230. [In Russian]
13. Kalitkin N. N. *Chislennyye metody: uchebnyy dlya vuzov* [Numerical methods: textbook for universities]. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2011, 592 p. [In Russian]
14. Flach P. *Machine Learning. The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data: monograph*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015, 400 p.
15. Brink H., Richards J. W., Fetherolf M. *Real Word. Machine Learning: monograph*. Shelter Island, New York, USA: Manning Publications, 2017, 338 p.
16. Eykhoff P. *Systems identification: parametrs and state estimation: monograph*. Eindhoven, Netherlands: University of technology, 1975, 680 p.
17. Haykin S. *Neural Networks. A Comprehensive Foundation: university textbook*. Upper Saddle River, USA: Prentice hall, 2006, 1105 p.
18. Pyukke G. A., Strel'nikov D. S. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kamchatka state technical University]. 2013, no. 24, pp. 21–28. [In Russian]
19. Kozlova L. E. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2013, no. 5, pp. 44–50. [In Russian]
20. Kalistratov T. A. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tomsk state University]. 2019, vol. 19, iss. 6, pp. 1845–1848. [In Russian]
21. Diveev A. I. *Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya: tr. X Mezhdunar. konf. (Moskva, 26–29 yanvarya, 2015 g.)* [Identification of systems and management tasks: pr. X international conf. (Moscow, January 26–29, 2015)]. Moscow, 2015, pp. 141–148. [In Russian]
22. Diveev A. I. *Cloud of Science*. 2016, vol. 3, no. 2, pp. 290–301. [In Russian]
23. Dang Tkhi Fuk., Diveev A. I., Sofronova E. A. *Cloud of Science*. 2018, vol. 5, no. 1, pp. 147–162. [In Russian]
24. Diveev A. I., Lomakova E. M. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Ser.: Inzhenernyye issledovaniya* [Bulletin of the peoples' friendship University of Russia. Ser.: Engineering research]. 2017, vol. 18, no. 1, pp. 125–134. [In Russian]
25. Antonov A. V. *Sistemnyy analiz: uchebnyy dlya vuzov* [System analysis: textbook for universities]. Moscow: Vyssh. shk., 2004, 454 p. [In Russian]
26. Pechinkin A. V. et al. *Teoriya veroyatnostey: uchebnyy dlya vuzov* [Probability theory: textbook for universities]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Ba-umana, 2004, 456 p. [In Russian]
27. Volkov I. K., Zuev S. M., Tsvetkova G. M. *Sluchaynye protsessy: uchebnyy dlya vuzov* [Random processes: a textbook for universities]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 1999, 448 p. [In Russian]

Старостин Игорь Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра электротехники
и авиационного электрооборудования,
Московский государственный
технический университет гражданской авиации
(Россия, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20)
E-mail: starostinigo@yandex.ru

Starostin Igor Evgenievich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of electrical engineering
and aviation electrical equipment,
Moscow State Technical University of Civil Aviation
(20 Kronstadt boulevard, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Старостин, И. Е. Получение моделей надежности технических объектов из потенциально-поточных уравнений физико-химических процессов в этих объектах / И. Е. Старостин // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 1 (29). – С. 5–12. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-1-1.