УДК 519.2

М.С. Никулин, М.В. Сильников, К.А. Дубаренко

О РАЗВИТИИ И ВНЕДРЕНИИ МЕТОДОВ СТАТИСТИКИ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

M.S. Nikulin, M.V. Silnikov, K.A. Dubarenko

ON THE DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION METHODS OF STATISTICS OF ACCELERATED TESTS FOR SAFETY ANALYSIS, RELIABILITY AND QUALITY OF PRODUCTS OF HIGH TECHNOLOGIES

Рассмотрено новое направление обработки результатов наблюдений, а также и другие направления развития математической статистики, где достигнуты интересные для инженера результаты. Выполнен анализ методов статистики ускоренных испытаний для анализа безопасности, надежности и качества продукции высоких технологий. Рассмотрены модели долговечности (модели Лемана, Кокса, AFT, Седякина), адаптированные к изменениям в условиях проведения эксперимента, способные учитывать влияния всех важных факторов — усталости, износа, старения, деградации и т. п.

СТАТИСТИКА УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ; АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ; НАДЕЖНОСТЬ; МОДЕЛИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ; УСТАЛОСТЬ; ИЗНОС; СТАРЕНИЕ; ДЕГРАДАЦИЯ.

The article describes a new direction of observation results processing as well as other directions of the development of mathematical statistics with the results interesting to an engineer.
The comparison of methods of accelerated tests statistics for safety analysis is performed alongside with durability and quality analysis of high technology products.
The timeproof models are represented (Lehmann, Cox, AFT, Sedyakin models) in adoption to different experiment conditions, the models capable to take into consideration the influence of all the important factors — tiredness, weariness, aging, degradation.

ACCELERATED TESTS STATISTICS; SAFETY ANALYSIS; DURABILITY; TIMEPROOF MODELS; TIREDNESS; WEARINESS; AGING; DEGRADATION.

Сегодня, в эпоху бурного развития новых технологий, промышленность выпускает высококачественные, надежные, сложные и дорогостоящие изделия, системы. При этом ужесточаются требования по формированию технической документации на продукцию, в которой необходимо отмечать основные характеристики надежности и качества и формулировать гарантийные обязательства предприятия-изготовителя продукции с учетом старения, деградации и условий эксплуатации изделий. Для решения такой задачи проводят специальным образом организованные *ускоренные испытания* в динамически меняющейся среде, которые часто позволяют существенно сократить время испытаний.

Инженеры, статистики и специалисты по теории надежности должны оптимальным образом спланировать такого рода испытания, а затем пересчитать их результаты на нормальные условия, в которых и предполагается осуществлять эксплуатацию изделий.

При этом необходимо учитывать, что для обеспечения конкурентной способности оборудования производство непрерывно обновляют, а вместе с этим изменяются *стандарты по контролю качества*. Задача специалистов по надежности и математической статистике состоит в разработке и адаптации планов ускоренных испытаний.

Методы статистики ускоренных испытаний позволяют принимать решение о надежности систем при их эксплуатации в *стандартных условиях* по результатам экспериментов, проведенных в условиях *повышенных нагрузок* (так называемые, ускоренные испытания) за более короткое время, что позволяет получить требуемые результаты за существенно более короткий срок, который удовлетворяет заказчика.

В первую очередь методы статистики ускоренных испытаний стали применять для проверки качества и надежности изделий высоких технологий, когда наблюдается мало отказов, что естественно при анализе долговечности и качества высоконадежных технических систем, например объектов ядерной энергетики, космических технологий и т. п., эксплуатируемых при этом нередко в различных, меняющихся во времени условиях.

Методы статистики ускоренных испытаний допускают к рассмотрению *цензурированные данные*, которые экспериментатор получает в результате исчезновения некоторых объектов по разным причинам. Более того, если изделия очень надежные и поэтому наблюдается очень мало отказов, то в таких случаях предлагается использовать так называемые *деградационные модели*, которые позволяют учитывать дополнительную информацию в терминах некоторых наблюдаемых процессов старения, износа, усталости и деградации с учетом влияния внешних факторов, в том числе и человеческого (стрессы, ковarианты), на скорости протекания деградационных процессов.

Заметим, что здесь речь идет об изучении, исследовании и внедрении в практику новых, так называемых динамических регрессионных, моделей для анализа неоднородных статистических данных.

Модели Лемана на множестве постоянных стрессов

Предположим, что системы очень надежны и вероятность наблюдения отказов за отведенное время t при проведении испытаний крайне мала. В этом случае проводят испытания, частично или полностью, при нагрузках, превышающих обычные эксплуатационные. Такие испытания называются *ускоренными испытаниями*. Проведение ускоренных испытаний в условиях воздействия повышенных нагрузок укорачивает длительность жизни систем, и отказы могут произойти в течение заданного времени t. Цель применения методологии ускоренных испытаний состоит в том, чтобы на основании информации, полученной за заданное время t при воздействии повышенных нагрузок, оценить время жизни объекта при нормальных условиях или при других интересующих исследователя воздействиях целого комплекса факторов. Суть ускоренных испытаний состоит в том, что за счет подбора комплекса факторов, в условиях воздействия которых функционирует объект, добиваются эффекта «сжатия» «времени жизни» объекта, при этом удается получить информацию, необходимую для статистических выводов о надежности систем. Очевидно, что для обработки такой информации надо иметь *модели долговечности*, адаптированные к изменениям в условиях проведения эксперимента, способные учитывать влияние всех важных факторов (таких, как *усталость*, *износ*, *старение*, *деградация* и т. п.) на долговечность испытуемых систем. Такие модели долговечности выражаются в терминах ковариант, возможно, зависящих от времени, и их называют *моделями ускорения жизни*.

Стрессы

Комплекс воздействующих факторов будем представлять в виде вектор-функции $\mathbf{x}(\cdot) = (x_1(\cdot), \ldots, x_m(\cdot))^T : [0,\infty) \to \mathbf{R}^m$, компоненты которой могут быть функциями, зависящими от времени.

В теории ускоренных испытаний $\mathbf{x}$ называется *вектором поясняющих переменных, вектором ковариант, нагрузкой* или просто *стрессом*.

Заметим, что стрессы могут быть как постоянными, так и зависящими от времени — монотонно-возрастающими или убывающими, выпуклыми, вогнутыми, периодическими, ступенчатыми и т. д., что позволяет экспериментатору проводить (в некотором смысле планировать или управлять) сложные эксперименты и при этом контролировать влияние различных физических или химических процессов и т. д. на долговечность систем.

Стресс $\mathbf{x}(s)$, где $0 \le s \le t$, описывает условия эксплуатации системы за период $[0, t]$. С другой стороны стресс $\mathbf{x}(s)$, $0 \le s \le t$ можно интерпретировать разным образом: как *историю* эволюции системы, как *управление*, как *план* проведения эксперимента и т. д. Компоненты стресса $\mathbf{x}$ могут соответствовать различным характеристикам, оказывающим влияние на работоспособность объекта, — внутренним характеристикам объекта, внешним воздействующим факторам, эксплуатационным нагрузкам, различного типа воздействиям, например мероприятиям, связанным с техническим обслуживанием и ремонтом систем, а также с проведением контрольных проверок исправности функционирования. Покажем на двух простых примерах возможности построения содержательных моделей с ковариантами, которые позволяют учитывать зависимость долговечности от условий проведения эксперимента. Для начала рассмотрим случай постоянных нагрузок, который легко распространяется на случай нагрузок, зависящих от времени.

Обозначим как E множество всех *допустимых* (*возможных*) стрессов. И пусть E_1 — множество стрессов, постоянных во времени, $E_1 \subset E$. Пусть T_{x_0} — наработка объекта в *нормальных* (*обычных*, *идеальных*) условиях эксплуатации, которые соответствуют нормальному стрессу x_0; пусть $P_0(t) = P_{x_0}(t)$ — ее функция надежности при нормальном стрессе x_0. Далее, пусть x — произвольная постоянная во времени нагрузка из множества $E_1 \subset E$.

Модели

Необходимо ответить на вопрос: какова функция надежности $P_x(t)$ наработки до отказа T_x при нагрузке x, отличной от нормальной нагрузки x_0 ($x \in E_1 \subset E$)? Ясно, что изменение ковариант приводит к изменению законов распределения наработки до отказа. Это означает: если хотим уметь изучать долговечность системы при разных экспериментальных условиях, мы должны уметь строить семейство функций надежности $\{P_x(t),\ x \in E_1 \subset E\}$.

Изложим два простых примера из теории ускоренных испытаний, которые показывают, как можно строить такие модели (семейства) на множестве E_1 допустимых стрессов, постоянных во времени, $E_1 \subset E$.

В теории ускоренных испытаний широкое применение находят следующие две простые модели $\{P_x(t),\ x \in E_1 \subset E\}$ на множестве E_1. Эти две модели, которые мы будем называть *моделями Лемана* на $E_1 \subset E$, демонстрируют интересные возможности построения моделей. Предположим сначала, что существует некоторая положительная функция

$$r : E \to R^1_+ ,$$

которая показывает, например, суммарный эффект влияния коварианты (нагрузка, стресс) на долговечность (продолжительность безотказной работы) системы. Эта функция называется *функцией связи* (link function).

Согласно первой модели Лемана на E_1 для любой нагрузки $x \in E_1$ функция вероятности безотказной работы задается формулой

$$P_x(t) = P_0^{r(x)}(t), \quad x \in E_1 \subset E, \quad t > 0,$$

где $P_x(t)$ — функция надежности (вероятность безотказной работы) при стрессе x; $P_0(t)$ — функция надежности при нормальном стрессе x_0, которую часто называют *базовой* функцией надежности.

Заметим, что функция $r(\cdot)>0$ и в общем случае она является неизвестной. Естественно считать, что в условиях нормальной эксплуатации $r(x_0) = 1$. Из определения первой модели следует, что все стрессы x ($x \in E_1 \subset E$), при которых $r(x)>1$, соответствуют воздействию стрессов, характерных для ускоренных испытаний, причем

$$P_x(t) < P_{x_0}(t);\ t > 0.$$

В этом случае говорят, что *стресс x является ускоренным* по отношению к x_0 и, как легко заметить, график функции $P_x(t)$ лежит ниже графика функции $P_{x_0}(t)$. Соответственно, при $0 < r(x) < 1$ имеем случай функционирования объекта в условиях пониженных нагрузок или щадящих испытаний, при этом

$$P_x(t) > P_{x_0}(t),\ t > 0.$$

Из последней формулы следует, что график функции $P_{x_0}(t)$ лежит ниже графика функции $P_x(t)$. Здесь нормальный стресс x_0 ускорен по отношению к стрессу x.

Для этой модели на E_1 можно легко получить выражение, связывающее интенсивности отказов объектов, функционирующих в нормальных условиях и в любых других допустимых условиях, отличных от нормальных:

$$\lambda_x(t) = r(x)\lambda_0(t), \quad x \in E_1 \subset E, \quad t > 0, \quad (1)$$

где $\lambda_x(t)$ — интенсивность отказов объектов, функционирующих при стрессе x; $\lambda_0(t)$ — интенсивность отказов объектов, функционирующих в нормальных условиях x_0. Данная функция называется *базовой функцией интенсивности отказов*. Модель (1) — *непараметрическая*, так как функции r и $\lambda_0(t)$ в общем случае неизвестны.

Модель Кокса

В рассматриваемой модели функцию связи можно параметризовать, например в виде линейной регрессионной зависимости

$$r(x) = e^{\beta^T x},$$

откуда получим *семи-параметрическую* регрессионную модель

$$\lambda_x(t) = e^{\beta^T x}\lambda_0(t),$$

где $x \in E_1 \subset E$, $t > 0$.

Данная модель хорошо известна как *модель пропорциональных интенсивностей*, которая впервые была введена и изучена Коксом (1972).

Вторая модель Лемана на $x \in E_1 \subset E$ вводится иным способом, а именно: для любой нагрузки из E_1

$$P_x(t) = P_0(r(x)t), \; x \in E_1 \subset E, \; t > 0,$$

где, как и прежде, $r(\cdot) > 0$ — некоторая положительная функция,

$$r : E \to R_+^1,$$

которая показывает *суммарный эффект* влияния ковариант (нагрузка, стресс) на долговечность (продолжительность безотказной работы) системы. Согласно второй модели Лемана на $x \in E_1 \subset E$ плотность распределения наработки до отказа и интенсивность отказов можно представить соответственно в виде

$$f_x(t) = r(x) f_0[r(x)t], \; t > 0;$$

$$\lambda_x(t) = r(x)\lambda_0[r(x)t], \; t > 0. \quad (2).$$

Модель AFT

Модель для интенсивности отказов в виде (2) называется AFT (*accelerated failure time*) моделью на E_1 (см., например, Meeker and Escobar (1998), Bagdonavicius and Nikulin (2002), Couallier et al., (2014)). Она более гибкая, чем модель пропорциональных интенсивностей, так как функция связи осуществляет как преобразование времени, так и масштабирование функции интенсивности.

В общем случае в моделях (1), (2) функция базовой интенсивности отказов $\lambda_0(t)$ и функция связи r могут быть неизвестны; тогда мы имеем *непараметрическую* модель. Если функцию связи параметризовать, как это сделано в модели Кокса, а функцию базовой интенсивности отказов $\lambda_0(t)$ по-прежнему считать неизвестной, то получим *семи-параметрическую модель*. И, наконец, если параметризовать и функцию связи, и функцию базовой интенсивности отказов, то будем иметь *параметрическую модель*. Например, как и выше, мы можем предположить, что $r(x) = e^{\beta^T x}$, и в то же время допустить, что базовая функция надежности $P_0(t)$ принадлежит, например, двухпараметрическому семейству Вейбулла.

Отметим, что модель пропорциональных интенсивностей хорошо работает в случае, когда воздействующие нагрузки имеют сравнительно небольшие отклонения по сравнению с нормальными режимами эксплуатации. Ввиду этого данная модель нашла широкое применение в медицинских исследованиях (см,. например, Nikulin, Commenges and Huber (2006), Bagdonavicius et al. (2011)). В технике же возможно применение экспериментов при условиях, существенно отличающихся от стандартных (нормальных), и поэтому модель Кокса не получила в индустриальной статистике такого широкого распространения, как модель AFT. В планировании и обработке результатов экспериментов в технике и инженерном деле более популярна AFT модель, которая допускает широкий диапазон изменения ковариант. Наконец, заметим, что в российской научной литературе эта модель известна скорее как *модель аддитивного накопления повреждений,* благодаря работе Багдонавичюса (1978). Мы рекомендуем читателю познакомиться с интересными и весьма поучительным примерами применения модели AFT на E_1, приведенными в книгах Meeker and Escobar (1998), Nikulin et al. (2010). Обширная библиография по этим вопросам приведена в списке литературы к нашей статье. Особенно мы рекомендуем посмотреть эту литературу, чтобы познакомиться с разными применениями ступенчатых стрессов и их ролью в организации оптимальных планов экспериментов при ускоренных испытаниях, а также новыми классами моделей (например с *моделью Седякина*), хорошо адаптируемых для обработки данных ускоренных испытаний.

Пример. Принцип Седякина

Физический принцип в теории надежности утверждает, что для двух партий однотипных систем, функционирующих при стрессах $x_1 \neq x_2$, моменты t_1 и t_1^* эквивалентны, если вероятности безотказной работы до этих моментов равны, т. е.

$$P(T_{x_1} > t_1) = P_{x_1}(t_1) = P_{x_2}(t_1^*) = P(T_{x_2} > t_1^*)$$

$$\text{для } x_1, x_2 \in E_1.$$

Этот принцип, предложенный Н. Седякиным (1966), дает интересный подход к продолжению произвольного класса функций надежности $\{P_x(\cdot), x \in E_1\}$, заданных на множестве постоянных стрессов E_1, до класса функций надежности, заданных на ступенчатых стрессах, например на E_2:

$$x(t) = x_1 1_{\{0 \le t < t_1\}} + x_2 1_{\{t_1 \le t\}}, \quad t > 0, \quad \forall x_1, x_2 \in E_1.$$

При таком *двухступенчатом стрессе* функция надежности до времени t_1 совпадает с функцией надежности P_{x_1}, но остается открытым вопрос, какой вид имеет эта функция после момента переключения t_1, т. е. как скачок в нагрузке от значения x_1 к значению x_2 сказался на надежности системы. Один из возможных ответов на этот вопрос дает принцип Седякина.

Модель Седякина. Согласно Седякину, в некоторых ситуациях разумно рассмотреть следующую модель на E_2:

$$\lambda_{x(\cdot)}(t_1 + s) = \lambda_{x_2}(t_1^* + s), \quad \forall s \ge 0, x(\cdot) \in E_2. \quad (3)$$

Значение этого *правила сдвига* по времени для ступенчатых стрессов из E_2 легко понять в терминах функций надежности $P_{x(\cdot)}(t),\ x(\cdot) \in E_2$, которые тоже удовлетворят правилу сдвига во времени:

$$P_{x(\cdot)}(t) = \begin{cases} P_{x_1}(t), \ 0 \le t < t_1; \\ P_{x_2}(t - t_1 + t_1^*), t \ge t_1. \end{cases} \quad (4)$$

То есть согласно принципу Седякина имеем следующий результат: при переключении нагрузки в точке t_1 от значения x_1 к значению x_2 изменение функции вероятности безотказной работы $P_{x(\cdot)}(t), x(\cdot) \in E_2$ в точке t_1 происходит непрерывным образом, переходя с функции надежности $P_{x_1}(t)$ на функцию надежности $P_{x_2}(t)$ по правилу (4), где *моменты* t_1 *и* t_1^* *эквивалентны в смысле принципа Седякина :* в точке t_1 выполняется условие $P_{x_1}(t_1) = P_{x_2}(t_1^*)$.

Следуя результатам работ Седякина (1966) и Багдонавичюса (1978) модель, определяемая формулой (3) (или (4)), называется *моделью Седякина на* E_2. Согласно *общей модели Седякина* (GS) предполагается, что функция интенсивности отказов в любой момент времени t зависит от значения стресса в этот момент и от функции надежности до этого момента:

$$\lambda_{x(\cdot)}(t) = g\left(x(t), P_{x(\cdot)}(t)\right), \quad x(\cdot) \in E.$$

Заметим, что среди рассмотренных здесь моделей только модель AFT удовлетворяет этому правилу. Легко показать, что для общей модели Седякина имеют место соотношения (3) и (4) (см. Bagdonavicius and Nikulin (2002)).

Наконец, отметим, что в работе Bagdonavicius and Nikulin (1997) построен критерий согласия для проверки модели Седякина, которая с успехом используется для статистического анализа надежности сложных систем с разным типом *резервирования*: как *холодным* и *горячим*, так и *теплым*.

Сегодня во всех развитых странах активно применяется статистика ускоренных испытаний.

Исследования американских, китайских, французских и японских статистиков показывают очень интересные перспективы применения теории ускоренных испытаний в индустриальной статистике, например при изучении отказов высоконадежных изделий и систем, в частности таких, как атомные электростанции, двигатели самолетов и поездов и т. д., а также при применении статистических методов в анализе данных гарантийного ремонта автомобилей или при изучении долговечности шин, при контроле качества современными методами и т. д.

Статистика ускоренных испытаний представляет собой новое направление исследований в математической статистике, которое появилось в конце прошлого века и бурно развивается сегодня во всех направлениях производственной и научно-исследовательской деятельности инженеров, врачей, ученых, экономистов, и т. д., в связи с естественным желанием сократить время создания новых технологий, повысить их надежность, сделать их более эффективными и при этом добиться этого наиболее экономным образом.

Первые серьезные результаты появились в монографиях V. Viertle (1988), W. Nelson (1990), W. Meeker, L. Escobar (1998), V. Bagdonavicius, M. Nikulin (1995, 1998, 2002), T. Martinussen, T. Scheike (2006), M. Nikulin, L. Gerville-Réache, V. Couallier (2007), V. Bagdonavicius, J. Kruopis, M. Nikulin (2011), А. Антонов, М. Никулин (2012).

Редакция и авторы надеются, что инженеру будет интересно познакомиться с рассмотренным здесь новым направлением обработки результатов наблюдений, а также и другими направлениями развития математической статистики, где достигнуты новые и интересные результаты, например в теории моделей деградации, в теории применения критериев типа хи-квадрат и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Cox D.** Regression models and life tables. *J.R. Statist. Soc.*, 1972. **B 34**, P. 187–220.

2. **Meeker W., Escobar L.** Statistical methods for reliability data. J.Wiley. NY, Hoboken, 1998. 630 p.

3. **Couallier V., Gerville-Reache L., Limnios N., Hiber C., Mesbah M.** Statitical Models ans Methods for Reliability and Survival Analysis. *ISTE*. 2014.

4. **Sedyakin N.M.** On one physical principle in reliability theory. *Thechnical Cybernetics*. 1966. Vol. 3, P. 80–87.

5. **Васильев Ю.С., Дубаренко К.А., Ермилов В.В.** Высшее образование — фактор устойчивого развития России // Научно-технические ведомости СПбГПУ: Наука и образование. 2012. № 3(154). Т. 1. С. 40–59.

6. **Bagdonavicius V., Nikulina V.** A goodness-of-fit test for Sedyakin's model. *Revue Roumaine de Mathematiques Pures et Appliquees*. 1997. Vol. 42, №1. P. 5–14.

7. **Bagdonavicius V., Nikulin M.** Accelerated Life Models : Modeling and Statistical Analysis. Chapman&Hall, 2002.

8. **Bagdonavicius V., Kruopis J., Nikulin M.S.** Nonparametric tests for censored data. J.*Wiley-ISTE*. 2011.

9. **Nikulin M., Commenges D., Huber C.** Probability, Statistics and Modelling in Public Health. New-York: Springer, 2006. 479 p.

10. **Nikulin M.S., Limnios N., Balakrishnan N., Kahle W., Huber, C.** Advances in Degradation Modeling. Applications to Reliability, Survival Analysis, and Finance. New York: Birkhauser, 2010.

11. **Антонов А.В., Никулин М.С.** Статистические модели в теории надежности: Учеб. пособие М.: Абрис (Высш. шк.), 2012. 390 с.:ил.

12. **Antonov V., Huber C., Nikulin M., Polischook V.** (eds.) Longevity, Aging and Degradation Models in Reliability, Public Health, Medicine and Biology. St. Petersburg: St. Petersburg State Polytechnic University. 2004. Vol. 1. 368 p.

13. **Васильев Ю.С., Дубаренко К.А., Ермилов В.В.** Управление устойчивым инновационным развитием России : проблемы опережающей подготовки кадров в системе непрерывного образования // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах : материалы XVIII Международной научно-методической конференции 17–18 февраля 2011 г. : пленарные доклады / Международная академия наук высшей школы. Санкт-Петербургское отделение; Санкт-Петербургского государственного политехнического университета [и др.]. СПб., 2011. С. 54–68.

REFFERENCES

1. **Cox D.** Regression models and life tables. *J.R. Statist. Soc.*, 1972.B 34, P. 187–220.

2. **Meeker W., Escobar L.** Statistical methods for reliability data. *J. Wiley*. NY, Hoboken, 1998. 630 p.

3. **Couallier V., Gerville-Reache L., Limnios N., Hiber C., Mesbah M.** Statitical Models ans Methods for Reliability and Survival Analysis. *ISTE*, 2014. (rus.)

4. **Sedyakin N.M.** On one physical principle in reliability theory. *Thechnical Cybernetics*. 1966. Vol. 3. P. 80–87.

5. **Vasilyev Yu.S., Dubarenko K.A., Yermilov V.V.** Vyssheye obrazovaniye — faktor ustoychivogo razvitiya Rossii. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*: *Nauka i obrazovaniye*. 2012. № 3(154). Vol. 1. S. 40–59.

6. **Bagdonavicius V., Nikulina V.** A goodness-of-fit test for Sedyakin's model. *Revue Roumaine de Mathematiques Pures et Appliquees*. 1997. Vol. 42. №1. P. 5–14.

7. **Bagdonavicius V., Nikulin M.** Accelerated Life Models: Modeling and Statistical Analysis. *Chapman&Hall*, 2002.

8. **Bagdonavicius V., Kruopis J., Nikulin M.S.** Nonparametric tests for censored data. *J.Wiley-ISTE*, 2011.

9. **Nikulin M., Commenges D., Huber C.** Probability, Statistics and Modelling in Public Health. *New-York: Springer*, 2006. 479 p.

10. **Nikulin M.S., Limnios N., Balakrishnan N., Kahle W., Huber C.** Advances in Degradation Modeling.

Applications to Reliability, Survival Analysis, and Finance. New-York: Birkhauser, 2010.

11. **Antonov A.V., Nikulin M.S.** Statisticheskiye modeli v teorii nadezhnosti: Ucheb. posobiye. M.: Abris (Vyssh. shk.), 2012. 390 s.:il.

12. **Antonov V., Huber C., Nikulin M., Polischook V.** (eds.) Longevity, Aging and Degradation Models in Reliability, Public Health, Medicine and Biology. *St. Petersburg: St. Petersburg State Polytechnic University*. 2004. Vol. 1. 368 p. (rus.)

13. **Vasilyev Yu.S., Dubarenko K.A., Yermilov V.V.** Upravleniye ustoychivym innovatsionnym razvitiyem Rossii : problemy operezhayushchey podgotovki kadrov v sisteme nepreryvnogo obrazovaniya. *Vysokiye intellektualnyye tekhnologii i innovatsii v natsionalnykh issledovatelskikh universitetakh : materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii 17–18 fevralya* 2011 g. : *plenarnyye doklady* / Mezhdunarodnaya akademiya nauk vysshey shkoly. Sankt-Peterburgskoye otdeleniye; Sankt-Peterburgs. 2001. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НИКУЛИН Михаил Степанович — кандидат физико-математических наук почетный профессор университета г. Бордо, Франция; 3 ter place de la Victoire, case 35, F-33076, Bordeaux, Cedex, France; e-mail: mikhail.nikouline@u-bordeaux2.fr

СИЛЬНИКОВ Михаил Владимирович — доктор технических наук профессор директор института военно-технического образования и безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, член-корреспондент РАН; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: director@mes.spbstu.ru

ДУБАРЕНКО Константин Андреевич — кандидат исторических наук доцент кафедры экстремальных процессов в материалах и взрывобезопасности института военно-технического образования и безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: dekan_fkb@mail.ru

AUTHORS

NIKULIN Mikhail S. — Bordeaux University. France; 3 ter place de la Victoire, case 35, F-33076, Bordeaux, Cedex, France; e-mail: mikhail.nikouline@u-bordeaux2.fr

SILNIKOV Mikhail V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: director@mes.spbstu.ru

DUBARENKO Konstantin A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: dekan_fkb@mail.ru