

"  
"  
"  
"  
"  
"  
"  
"  
"  
"  
"  
"  
"  
"  
"  
"  
"  
"  
"  
"  
"

УДК 621.039.56

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА РЕСУРСОСПОСОБНОСТИ ИЗДЕЛИЙ\***

**Канд. техн. наук, проф. МАЛОВИК К. Н.**

*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности*

В современной ядерной и тепловой энергетике, нефтегазовой отрасли, промышленных комплексах металлургических и машиностроительных предприятий важное значение уделяется анализу долговечности изделий. Под изделием можно понимать, например, элементы систем и оборудования энергоблоков и конструкций АЭС, а также других объектов критического применения (ОКП).

---

\* Печатается в порядке обсуждения.

Рассматривая ресурсоспособность изделия как комплекс его ресурсных характеристик, значительный интерес представляют предельные (экстремальные) значения параметров его технического состояния [1].

В последнее время при решении задач в указанной области существенное внимание приобретают вопросы экстремального поведения элементов отдельных конструкций, а также теоретические исследования ресурсных характеристик элементов систем важных для безопасности энергоблоков АЭС или ОКП при различного рода воздействиях. При этом рассматриваются вопросы усовершенствования методов оценивания предельного состояния конструктивных элементов как доминирующей ресурсной характеристики изделий АЭС или ОКП.

Классически [1] рассматриваются два подхода к исследованию ресурсных характеристик, один из которых использует математические методы детерминированного анализа для исследования, оценки и контроля надежности изделий [2, 3], а другой основан на стохастическом исследовании, оценке и контроле надежности изделий [4] с помощью вероятностно-статистических методов. При описании и анализе закономерностей надежности изделий АЭС или ОКП, оценивании и прогнозировании их ресурсных характеристик в условиях механики разрушения (деградации), целесообразно применение комплексного подхода, учитывающего особенности как детерминированного, так и стохастического анализа, дополняющего друг друга.

Для решения прикладных задач по анализу и управлению безопасностью, эффективностью и ресурсом все возрастающую актуальность приобретают подходы и методы, развиваемые в рамках современной теории вероятностей экстремальных значений [4]. Возраст классической теории вероятности экстремальных значений – асимптотической теории распределений для экстремумов независимых одинаково распределенных случайных величин – можно оценить в 70–80 лет, хотя корни этой теории уходят в глубь веков. Развитие этой теории имеет эволюционный процесс (табл. 1). Следует отметить, что первые результаты по пути построения строгой теории экстремальных значений были получены Л. Борткевичем, который начал систематическое исследование экстремальных величин. Однако несомненным основоположником классической теории вероятностей экстремальных значений является Э. Гумбель.

Рассматривая эволюцию развития теории вероятностей экстремальных значений, используя материалы работ [1, 4], следует сказать, что одним из основных направлений ее дальнейшего развития предопределяется разработка методологических основ в области создания прикладных, численных методов для оценивания и прогнозирования ресурсных характеристик изделий АЭС и ОКП. Прежде всего, целесообразно решение этих задач для оценивания ресурсоспособности и предельного состояния изделий как их доминирующих ресурсных характеристик.

Известно [29], что предельное состояние изделия происходит при:

- необратимых формоизменениях конструкции или ее элементов;
- утонении стенок конструкции из-за коррозии;
- изменении геометрической формы вследствие механического или эрозионно-коррозионного износа;
- появлении на поверхности конструкции любых трещин;
- появлении в подповерхностных слоях металла конструкций недопустимых несложностей и др.

Таблица 1

## Эволюция развития методов теории вероятностей экстремальных значений

Автор	Год	Содержательная формулировка прикладных задач
М. Бернулли	1709	Задача по статистике страхования
Б. Пирс, В. Шовенэ	1852–1857	Критерий принятия или отвержения выпадающего значения [5, 6]
Л. Борткевич	1898–1922	Начало систематического исследования экстремальных величин [7–9]
Р. Мизес	1923	Фундаментальное понятие характеристической наибольшей величины [10]
Е. Додд	1923	Исследование наибольших значений для распределений, отличных от нормальных [11]
Л. Типпет	1925	Вычисление вероятностей наибольших значений нормальной выборки [12]
М. Фреше	1927	Впервые получено предельное распределение наибольших величин, отличных от нормальных [13]
Р. Фишер, Л. Типпет	1928	Показана медленная сходимости наибольшей величины из нормальной выборки [14]
П. Райдер	1933	Систематизация проблемы выпадающих значений [15]
Р. Мизес	1936	Классификация предельных распределений наибольших величин [16]
Б. В. Гниденко	1943	Получены необходимые и достаточные условия предельных распределений наибольших величин [17]
Г. Эльфинг	1948	Получены соотношения между предельным распределением размаха нормальной выборки и функциями Бесселя [18, 19]
	1953	Таблицы вероятностей для анализа экстремальных величин
Р. Лэми	1954	Систематизированное изменение теории предельных распределений экстремальных величин [20]
Э. Гумбель	1958–1965	Статистическая теория экстремальных значений [21, 22]
Г. Крамер	1969	Исследование и развитие теории вероятностей экстремальных значений [23]
С. Берман	1978–1985	Создание теории для стационарных нормальных последовательностей [24–26]
В. И. Тихонов, В. Н. Хищенко	1987	Приложения теории вероятностей экстремальных значений [27]
М. Литбеттер	1989	Построение классической теории экстремумов случайных последовательностей и процессов [28]

В соответствии с технологией ресурсного проектирования при соблюдении требований конструкторской документации на этапах изготовления и монтажа наступление предельного состояния при эксплуатации конструкции невозможно [1, 29].

В действительности фактически реализованный физический ресурс оказывается меньше назначенного ресурса и назначенного срока службы. Вариант соотношения различных ресурсов, показанный на рис. 1, определяется следующими предпосылками [29]:

- при проектировании практически невозможно реализовать принцип равнопрочности конструкции, в связи с чем большая ее часть обладает существенной избыточной ресурсоспособностью;
- при проектировании используют запасы прочности, которые могут быть уменьшены при получении положительного опыта ее предшествующей эксплуатации;

- применением во время эксплуатации более совершенных методик расчета по сравнению с методами, использованными на стадии проектирования.



Рис. 1. Вариант соотношения различных ресурсов

Одновременно на результаты эксплуатации изделий оказывают существенное влияние отказы и дефекты, классификации которых показаны в работах [29, 30].

В связи с изложенным, можно сказать, что современное состояние технологий ресурсного проектирования, изготовления и монтажа не способно обеспечить в полной мере назначенный ресурс эксплуатации и ресурсоспособности изделий. Поэтому эксплуатирующие АЭС организации и ОКП вынуждены создавать и реализовывать дополнительные технологии и методы проверки ресурсных характеристик изделий. Обусловленная таким образом проблема недостаточной ресурсоспособности изделий требует глубоких теоретических разработок и совершенствования на этой основе методов анализа и контроля их ресурсных характеристик.

Анализ ресурсных характеристик изделий показывает [31], что можно с помощью исследования интенсивности отказов  $\lambda(t)$  определить область ресурсоспособности (рис. 2), где обозначено:  $\lambda_{\Pi}^B$  – верхнее значение предельного уровня надежности;  $\lambda_{\Pi}^H$  – нижнее значение предельного уровня надежности;  $\Pi_{\Pi}$  – пессимистический прогноз изменения  $\lambda(t)$ ;  $\Pi_o$  – оптимистический прогноз изменения  $\lambda(t)$ ;  $T_{\Pi}^H - T_{\Pi}^B$  – диапазон времени, соответствующий пессимистической оценке ресурсоспособности;  $T_o^H - T_o^B$  – то же, соответствующий оптимистической оценке ресурсоспособности.

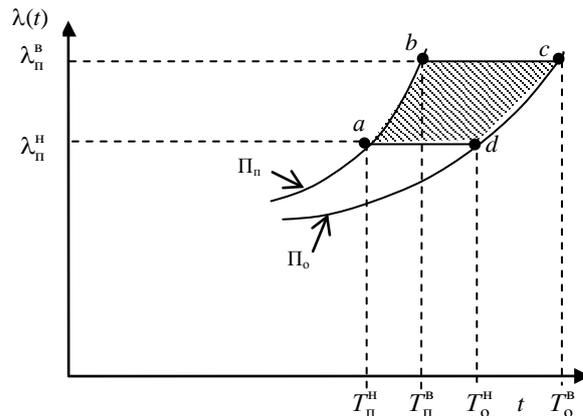


Рис. 2. Графическая интерпретация области ресурсоспособности

При построении области ресурсоспособности можно использовать подход [30] для определения работоспособности изделий при контроле их качества и надежности. Тогда следует рассмотреть критерии, которые характеризуют предельные состояния исследуемого изделия. В [32–35] подробно рассматриваются механизмы достижения предельных состояний и вопросы исследования основных ресурсных характеристик элементов трубопроводов АЭС как в детерминистическом, так и вероятностном аспектах, а также элементов трубопроводов газо- и нефтеперерабатывающих производств и механических систем. При этом подразумевается, что только на основе выявленного вида предельного состояния элемента (конструкции) следует выбирать критерий предельного состояния. Значительная часть этих критериев прямо или косвенно относится к характеристикам механических свойств металла, из которого изготовлена конструкция. Эти характеристики, являющиеся во многих случаях критериями предельного состояния, не должны рассматриваться как постоянные для данного материала. Под воздействием деградиационных процессов, протекающих в процессе эксплуатации конструкции, численные значения этих критериев предельного состояния существенно меняются [33]. В связи с изложенным и в развитие теории вероятностей экстремальных значений, показанной автором работы [36], в качестве оценки такого критерия предельного состояния можно использовать неравенства предела текучести материала  $\sigma_T$ :

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma_T] \text{ или } |\sigma_{\min} \leq [\sigma_T]|. \quad (1)$$

Если имеются результаты экспериментальных исследований кривой деформации при проведении испытаний на надежность, то на их основе можно получить исходные данные для построения предельных значений  $\lambda_{II}^B$  и  $\lambda_{II}^H$  как границ области ресурсоспособности элементов.

С использованием введенных понятий об области ресурсоспособности можно отметить, что ресурсные задачи по знаку времени делятся на два класса [29]:

- прямые, которые позволяют прогнозировать ресурсные характеристики;
- обратные, в которых время направлено в прошлое, а целью их решения является воссоздание процесса исчерпания ресурса эксплуатации конструкции.

Следовательно, при решении этих задач предполагается рассмотрение принципов и свойств энтропийно-временных моделей расходования ресурса изделий.

Из математической теории надежности известно [1], что

$$\int_0^t \lambda(t) dt = -\ln P(t), \quad (2)$$

где правая часть уравнения называется функцией ресурса изделия и является мерой необратимости процессов, ведущих к расходу запаса надежности и деградации изделия, а  $P(t)$  – вероятность безотказной работы, при этом интенсивность отказов есть мера скорости изменения его энтропии.

Тогда можно исследовать энтропийный критерий деградации, для чего используется следующее выражение [37]:

$$\frac{ds}{dt} = C \sum_{i=1}^n \frac{\partial q_i}{\partial(\Delta x_i)} \frac{d(\Delta x_i)}{dt}, \quad (3)$$

где  $C$  – положительная константа, связанная с выбором единиц измерения;  $s$  – энтропия состояния изделия, эквивалентная его ресурсу, выработанному за время  $t$ ;  $q_i$  – изменение вероятности отказа, вызванное изменением параметра конкретной нагрузки  $\Delta x_i$ ;  $n$  – число параметров, характеризующих действующие нагрузки;  $\frac{\partial q_i}{\partial(\Delta x_i)}$  – скорость изменения вероятности отказа, вызванного

изменением  $\Delta x_i$ , зависящих от качества материала, конструкции и технологии изготовления;  $\Delta x_i$  – разность между критическими (экстремальными) и действующими (средними) значениями нагрузок;  $\frac{d(\Delta x_i)}{dt}$  – скорость изменения величины запаса по нагрузке, зависит от конструкции, физических и физико-химических свойств материала.

Теоретически применение энтропийного критерия деградации при исследовании предельных (экстремальных) значений ресурсных характеристик изделия можно определить с помощью введенных обозначений  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  характера ограничений области ресурсоспособности  $\Pi_n$  и  $\Pi_o$ , показанных на рис. 2 [38].

Следует отметить, что, несмотря на недостатки вероятностных методов при оценке ресурсных характеристик [1, 29, 39], для ядерной энергетики известны расчетные методы определения и прогнозирования ресурса [40]:

- метод линейного суммирования повреждений;
- метод механики разрушения;
- методы параметрического прогнозирования ресурса;
- метод оценки и прогнозирования ресурса на основе анализа соотношения нагрузки и несущей способности оборудования.

При этом для любого подхода установления ресурсных характеристик изделий должны быть обоснованы прежде всего их предельно допустимые значения применительно как к АЭС, так и ОКП. Поэтому при определении области ресурсоспособности изделий в качестве ограничений  $\Pi_n$  и  $\Pi_o$ , а следовательно,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  (рис. 2), могут быть использованы выражения, соответствующие одному из указанных выше методов оценивания и прогнозирования ресурсоспособности изделий АЭС или ОКП.

Таким образом, для качественного исследования предельного состояния изделий АЭС или ОКП предложена область ресурсоспособности, которая позволяет:

- выделить критериальные оценки для предельных состояний изделий;
- использовать энтропийный критерий деградации;
- нормировать выбранные ресурсные характеристики.

Для этого необходима разработка прикладных задач, связанных с экстремальными величинами, при контроле качества материалов [4], а также совершенствование методов, основанных на использовании математического аппарата теории нечетких множеств, что позволяет исследовать ресурсные характеристики изделий методом экспертных оценок [41].

## ВЫВОДЫ

1. Показаны эволюция развития теории вероятностей экстремальных значений и целесообразность разработки методологических основ ее применения в виде прикладных, численных методов для оценивания и прогнозирования ресурсных характеристик изделий.
2. Предложен качественный подход к определению области ресурсоспособности изделий.
3. На основе использования энтропийного критерия деградации и оценки предельных значений кривой деформации возможно определение предельных значений технического состояния изделий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аркадов, Г. В. Надежность оборудования и трубопроводов АЭС и оптимизация их жизненного цикла: вероятностные методы / Г. В. Аркадов, А. Ф. Гетман, А. Н. Родионов. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 424 с.
2. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок: ПНАЭ Г-7-00286 / Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
3. Правила устройства и безопасности эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных электрических установок: ПН АЭГ-7-008–89. – М.: Энергоатомиздат, 1998.
4. Акимов, В. А. Введение в статистику экстремальных значений и ее приложения. МЧС России / В. А. Акимов, А. А. Быков, Е. Ю. Щетинин. – М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2009. – 524 с.
5. Peirce, B. Criterion for the rejection of doubtful observation / B. Peirce, J. Astron. – 1852. – № 2. – P. 161.
6. Chauvenet, W. A manual of Spherical and Practical Astronomy / W. Chauvenet. – Philadelphia, Lippincott, 1876. – Vol. 2. – P. 58.
7. Bortkiewicz, L. Das Gesetz der kleinen Zahlen / L. Bortkiewicz. – Leipzig: Teubner, 1898.
8. Bortkiewicz, L. Variationsbreite und mittlerer Fehler / L. Bortkiewicz // Sitzungberichte d. Berlin Math. Ges. – 1922. – Vol. 21. – P. 3.
9. Bortkiewicz, L. Die variation sbreitebeim Gauss'schen Fehlergesetz / L. Bortkiewicz // Nordisk Statistik Tidsskrift. – 1922. – No. 1. – P. 3; 13.
10. Mises, R. Über die variations breite einer Beobachtungsreihe / R. Mises // Sitzungsber. d. Berliner Math. Ges. – 1923. – Vol. 22. – P. 3.
11. Dodd, E. L. The greatest and least variate under general laws of error / E. L. Dodd // Trans. Am. Math. Soc. – 1923. – Vol. 25. – P. 525.
12. Tippett, L. H. C. On the extreme individuals and the range of samples taken from a normal population / L. H. C. Tippett // Biometrika. – 1925. – Vol. 17. – P. 364.
13. Frechet, M. Sur la loi de probabilité de l'ecart maximum / M. Frechet // Ann. De la Soc. Polonaise de Math. (Cracow). – 1927. – Vol. 6. – P. 93.
14. Fisher, R. A. Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a simple / R. A. Fisher, L. H. C. Tippett // Proc. Cambridge Phill. Soc. – 1928. – Vol. 24. – P. 180.
15. Rider, P. R. Criteria for Rejection of Observations. Washington Univ. Studies / P. R. Rider // Science and Tehnology. – 1933. – № 8.
16. Mises, R. La distribution de la plus grandede nvaleurs / R. Mises // Revue math, de l'union Interbalxanigae (Athens). – 1936. – Vol. 1. – P. 1.
17. Gnedenko, B. V. Sur la distribution limite du terme maximum d'unseriealeatoire / B. V. Gnedenko // Ann. Math. – 1943. – Vol. 44. – P. 423–453.
18. Elfving, G. The asymptotical distribution of range in samples from a normal population / G. Elfving // Biometrika. – 1947. – Vol. 34. – P. 111.
19. Gumbel, E. J. Discussion of B. F. Kimball. Assignment of frequencies to a completely order set of simple data / E. J. Gumbel // Trans. Am. Geophys. Union. – 1947. – Vol. 28. – P. 951.

20. L e m e, R. A. Os extremes de amostranocasionais e snasapplicac Ses a enereharian / R. A. Leme, Silva Da. – Thesis, Unifersity of S50 Panlo, 1954.
21. G u m b e l, E. J. Statistics of extremes / E. J. Gumbel. – New York: Colombia University Press, 1958.
22. Г у м б е л ь, Э. Статистика экстремальных значений / Э. Гумбель. – М.: Мир, 1965.
23. B e r m a n, S. M. Limiting distribution of sums of nonnegative stationary random variables / S. M. Berman // Ann. Inst. Statist Math. – 1984. – Vol. 36. – P. 301–321.
24. Б е р м а н, С. Времена пребывания и экстремумы гауссовских процессов / С. Берман // Случайные процессы. Выборочные функции и пересечения. – М.: Мир, 1978. – С. 165–203.
25. B e r m a n, S. M. An asymptotic formula for the distribution of the maximum of a Gaussi-anprocess with stationari increments / S. M. Berman // J. Appl. Probab. – 1985. – Vol. 22. – P. 454–460.
26. К р а м е р, Г. Стационарные случайные процессы / Г. Крамер, М. Лидбеттер. – М.: Мир, 1969. – 398 с.
27. Т и х о н о в, В. И. Выбросы траекторий случайных процессов / В. И. Тихонов, В. Н. Хищенко. – М.: Наука, 1987.
28. Л и д б е т т е р, М. Экстремумы случайных последовательностей и процессов / М. Лидбеттер, Г. Линдгрэн, Х. Ротсен. – М.: Мир, 1989. – 392 с.
29. Г е т м а н, А. Ф. Ресурс эксплуатации сосудов и трубопроводов АЭС / А. Ф. Гетман. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 427 с.
30. М а л о в и к, К. Н. Контроль качества и надежности: учеб.-метод. пособие / К. Н. Маловик. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2005. – 324 с.
31. М а л о в и к, К. Н. Анализ ресурсных характеристик при неоднородном потоке отказов изделий / К. Н. Маловик // Науково-технічний журнал. – Ивано-Франковск, 2011. – Вып. 26. – С. 85–89.
32. Г е т м а н, А. Ф. Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления / А. Ф. Гетман, Ю. Н. Козин. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 288 с.
33. Г о р и ц к и й, В. М. Диагностика металлов / В. М. Горицкий. – М.: Metallurgizdat, 2004. – 408 с.
34. Д м и т р и е в, В. Ф. Оценка остаточного ресурса нефтепровода и планирование его капитального ремонта / В. Ф. Дмитриев, Г. Х. Мурзаханов, Г. А. Филиппов // Строительство трубопроводов. – 1997. – № 3. – С. 21–24.
35. K a r n o w, V. A. Intrinsic Fatigue Curves Applied to Damage Evaluation of Laminate and Fabric Materials / V. A. Karnow // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 1997. – № 26. – P. 169–176.
36. П у х л и й, В. А. Однородные слоистые оболочки переменной жесткости: науч. тр. в 4 т. / В. А. Пухлий. – Севастополь, 2002. – Т. 2. – 362 с.
37. О с н о в ы управления качеством: учеб. пособие для вузов / К. Н. Маловик [и др.]. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2006. – 260 с.
38. М а л о в и к, К. Н. Разработка и совершенствование методов анализа ресурсоспособности систем, важных для безопасности АЭС / К. Н. Маловик, В. А. Пухлий // Безопасность, эффективность, ресурс ЯЭУ: тез. 9-й Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам атомной энергетики. – Севастополь-Ласпи, 2011, <http://icnpre.com.ua>
39. Г е т м а н, А. Ф. Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления / А. Ф. Гетман, Ю. Н. Козин. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 228 с.
40. О с т р е й к о в с к и й, В. А. Эксплуатация атомных станций: учеб. для вузов / В. А. Острейковский. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928 с.
41. М а л о в и к, К. Н. Метод экспертной оценки ресурсных характеристик изделий. Нові технології / К. Н. Маловик // Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. – 2011. – № 3 (33). – С. 19–30.

Представлена кафедрой  
технологий измерений и оценивания

Поступила 02.12.2011