

**На правах рукописи**

**ЗЮЛЯЕВА НАТАЛЬЯ ГРИГОРЬЕВНА**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЁЖНОСТИ  
ОБОРУДОВАНИЯ АЭС НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИМИ  
МЕТОДАМИ**

*Специальность 05.13.01 – системный анализ, управление  
и обработка информации (по энергетике)*

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Обнинск 2010**

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Обнинский государственный технический университет атомной энергетики»

Научный руководитель                      доктор технических наук, профессор  
Антонов Александр Владимирович

Официальные оппоненты:                доктор технических наук, профессор  
Гордон Борис Григорьевич

доктор технических наук, профессор  
Древс Юрий Георгиевич

Ведущая организация – Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций (ВНИИАЭС), г. Москва.

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г., в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.130.10 при Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: 249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1, зал заседаний ученого совета ИАТЭ НИЯУ «МИФИ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАТЭ НИЯУ «МИФИ». Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.130.10,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

В.Л. Шаблов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

В настоящее время уделяется повышенное внимание вопросам анализа надёжности оборудования энергоблоков АЭС. Основные мощности в ядерно-энергетической отрасли были пущены в 70–80-е годы XX столетия. В результате большое количество энергоблоков находится на грани исчерпания назначенного ресурса. С целью безопасного и надёжного функционирования энергоблоков в отрасли разработаны программы исследований в следующих направлениях: периодическая переоценка безопасности, управление старением, оптимизация технического обслуживания и ремонта, продление срока службы АЭС. В связи с этим возрастает ценность работ по анализу надёжности объектов ядерной энергетики и, как следствие, необходимость разработки методов анализа статистической информации о функционировании элементов, подсистем и систем АЭС с целью определения параметров их работоспособности.

В процессе анализа надёжности приходится сталкиваться с ситуациями, когда определенная часть объектов или систем не отказывает за период наблюдения, а другая часть отказывает, но моменты отказов точно неизвестны. Доступной является лишь информация об интервале времени, в котором произошёл отказ. Это связано с тем, что отказы большинства устройств фиксируются не мгновенно, а в некоторые, заранее спланированные моменты контроля исправности функционирования оборудования. В таких ситуациях возникает необходимость разработки методов статистического анализа надёжности на основе так называемых цензурированных выборок.

Объекты ядерных энергетических установок относятся к категории высоконадёжного оборудования. Объём данных об отказах такого оборудования ограничен. Поэтому для повышения достоверности оценок показателей надёжности необходимо использовать всю имеющуюся информацию, в том числе априорные данные о функционировании однотипных объектов в составе штатного оборудования других установок.

Применение параметрических методов для расчета надёжности систем требует предположения о виде закона распределения наблюдаемых случайных величин. В случаях, когда объём статистических данных мал, а вид закона распределения не очевиден, параметрические модели не позволяют адекватно описать реальный процесс отказов. Таким образом, *актуальными* становятся задачи разработки и исследования непараметрических методов анализа надёжности систем с учётом цензурированной и априорной информации в условиях ограниченного объёма данных об отказах изделий и приборов.

### **Цель и задачи исследования**

Цель представленной работы состоит в разработке непараметрических методов статистического анализа данных с учётом цензурированной и априорной информации, исследовании их и применении для определения характеристик надёжности функционирующих объектов энергоблоков АЭС.

Для достижения цели были решены следующие задачи.

1. Сформулирована проблема повышения достоверности расчетов характеристик надежности оборудования АЭС за счёт учёта цензурированной и априорной информации об эксплуатации исследуемых объектов методами непараметрического оценивания. Проведен анализ литературы, посвящённой данной проблеме.
2. Разработаны непараметрические методы оценки характеристик надежности систем и объектов АЭС на основании эксплуатационных данных с учётом априорной и цензурированной справа, слева и интервалом информации.
3. Разработаны алгоритмы определения оптимальных значений параметров, влияющих на качество ядерных и проекционных оценок плотности распределения наработок до отказа.
4. Создано программное обеспечение для обработки данных об отказах систем и объектов АЭС и расчёта их характеристик надежности. Проведена его апробация на тестовых примерах и реальных данных.
5. По разработанным моделям проведены расчеты характеристик надежности насосного оборудования системы подпитки и борного регулирования АЭС с ВВЭР-1000 концерна «Энергоатом», а также переключателей и датчиков расхода, уровня и давления энергоблоков с PWR900MW и PWR1300MW АЭС Франции.

### **Научная новизна**

- Разработаны методы, позволяющие, в отличие от известных на сегодняшний день методов непараметрической оценки характеристик надёжности объектов энергоблоков АЭС, проводить расчёты на основе выборок, содержащих как полные, так и цензурированные справа, слева и интервалом данные.
- Разработан метод построения ядерной оценки надёжности системы на основании текущей информации об отказах исследуемого объекта с учётом априорных данных о функционировании этого объекта или его аналогов.
- Для оценок плотности распределения наработок до отказа, построенных по разработанным моделям, получены алгоритмы определения доверительных интервалов и расчёта оптимальных значений параметров, влияющих на качество оценивания.
- Разработан метод проекционного оценивания параметра потока отказов (ППО), позволяющий по данным о моментах отказа оборудования АЭС

получать гладкие оценки ППО в отличие от его классической статистической оценки, которая строится по принципу гистограммы.

- На основе результатов тестовых испытаний на модельных данных разработаны критерии эффективности оценивания, осуществляемого полученными методами, при различных параметрах исходной информации.

### **Практическая значимость работы**

Все научные разработки доведены до инженерных методик с соответствующей программной реализацией. Предложенные методы внедрены и использовались при проведении расчетов характеристик надежности насосного оборудования системы подпитки и борного регулирования АЭС с ВВЭР-1000 концерна «Энергоатом», а также переключателей и датчиков расхода, уровня и давления энергоблоков с PWR900MW и PWR1300MW АЭС Франции. Они позволили с требуемой точностью получить оценки показателей безотказной работы, а также рассчитать необходимый объем запасных изделий и приборов (ЗИП) для заданного уровня надёжности.

**Достоверность научных положений** обеспечена применением широко известных методов теории вероятностей, теории надежности и математической статистики для описания состояния систем; корректным применением непараметрических методов при разработке моделей элементов и систем; применением численных методов при расчёте характеристик надёжности по полученным моделям; согласованностью частных случаев полученных моделей с разработками других авторов; опытом внедрения и практическим использованием полученных результатов.

### **Личное участие автора**

Основными научными результатами, полученными лично соискателем, являются:

- метод проекционной оценки характеристик надёжности исследуемых объектов с учётом цензурированной справа информации;
- процедура определения оптимальных значений параметров, влияющих на качество ядерной и проекционной оценок плотности распределения;
- метод учёта априорной информации при обработке данных об отказах с помощью ядерного оценивания;
- метод проекционной оценки ППО по данным о моментах отказов оборудования АЭС;
- алгоритмы построения доверительных интервалов для ядерной и проекционной оценок плотности распределения как по полным, так и по цензурированным данным;
- метод корневого оценивания плотности распределения наработок до отказа с использованием полных и группированных данных.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Непараметрические методы анализа характеристик надёжности объектов энергоблоков АЭС с учётом цензурированной информации всех видов: справа, слева и интервалом.
2. Алгоритмы получения оптимального значения параметра локальности для ядерной оценки и оптимального разложения исследуемого показателя в ряд по различным ортонормированным базисам для проекционной оценки.
3. Метод построения ядерной оценки надёжности системы на основании текущей информации об отказах исследуемого объекта с учётом априорных данных о функционировании этого объекта или его аналогов.
4. Результаты практических исследований и расчета характеристик надежности насосного оборудования системы подпитки и борного регулирования АЭС с ВВЭР-1000 концерна «Энергоатом», а также переключателей и датчиков расхода, уровня и давления энергоблоков с PWR900MW и PWR1300MW АЭС Франции.

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты работы докладывались на конференциях:

1. II международная конференция «Математические идеи П.Л.Чебышева и их приложение к современным проблемам естествознания». Обнинск: ИАТЭ, 2004.
2. IX международная конференции «Безопасность АЭС и подготовка кадров». Обнинск: ИАТЭ, 2005.
3. III международная конференция «Математические идеи П.Л.Чебышева и их приложение к современным проблемам естествознания». Обнинск: ИАТЭ, 2006.
4. X международная конференции «Безопасность АЭС и подготовка кадров». Обнинск: ИАТЭ, 2007.
5. VI Международной конференции MMR 2009. Mathematical methods in reliability. Theory, Methods. Applications. Moscow, 22–29 June, 2009.
6. XI международная конференции «Безопасность АЭС и подготовка кадров». Обнинск: НОУ «ЦИПК», 2009.

### **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 работах, в том числе в 5 статьях, три из которых в реферируемых журналах.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения со сквозной нумерацией внутри каждой главы. Общий объем диссертации составляет 177 страниц машинописного текста. Основной текст работы изложен на 163 страницах, включая 87 рисунков и 18 таблиц. Библиографический список литературы содержит 90 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность разработки непараметрических методов оценки характеристик надежности элементов и систем АЭС на основании информации об отказах, обозначены цели и задачи исследования. Сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые автором на защиту.

**Первая глава** посвящена анализу существующих литературных источников по теме диссертации, сравнению параметрических и непараметрических методов обработки статистической информации, определению и классификации цензурированных выборок.

В первом параграфе проведён обзор литературы по проблеме оценивания характеристик надежности различного рода оборудования. Рассмотрены работы по параметрическим и непараметрическим методам анализа статистической информации. Показано, что непараметрические методы обработки цензурированных данных и учёта априорной информации слабо представлены в печати. Сформулировано основное направление проводимых исследований: разработка непараметрических методов анализа данных об отказах элементов и подсистем АЭС с учётом априорной и цензурированной информации с целью определения характеристик надежности этого оборудования.

Во втором параграфе описаны основные задачи, для решения которых необходимо проводить анализ показателей надежности систем. Отмечено, что наиболее общей характеристикой, описывающей поведение исследуемого случайного показателя, является его плотность распределения, так как, зная плотность распределения, можно переходить к определению основных характеристик надёжности.

В третьем параграфе описана процедура параметрического оценивания. Проведён краткий обзор основных методов оценивания параметров закона распределения. Отмечены основные недостатки параметрических методов: они плохо работают на малых выборках и в случаях, когда исследуемый параметр подчиняется нестандартному (не входящему ни в одно параметрическое семейство) закону распределения.

В четвёртом параграфе описаны основные непараметрические методы оценивания плотности распределения: гистограммный, ядерный и проекционный. Отмечено, что указанные методы могут применяться для анализа данных ограниченного объёма и оценки любого как стандартного, так и нестандартного распределения, так как не требуют априорных предположений о его виде.

В пятом параграфе дано определение цензурирования. Приведена классификация цензурированных выборок. Сформулированы основные причины возникновения цензурированных данных.

В шестом параграфе описана процедура проведения исследований точности методов на модельных данных. Приведены формулы для расчёта ошибок оценивания.

**Вторая глава** посвящена разработке ядерных методов оценивания плотности распределения случайного параметра с учётом цензурированной и априорной информации.

В первом параграфе сформулирована задача расчёта показателей надёжности объектов АЭС методами ядерного оценивания. В рамках выбора методологической основы анализа надёжности на модельных данных построена зависимость точности ядерного метода (непараметрического) и метода максимального правдоподобия (параметрического) от объёма исходной выборки. Анализ результатов показал, что с уменьшением объёма исходной выборки ошибка оценивания для метода максимального правдоподобия растёт быстрее, чем для ядерного оценивания. Поэтому для анализа статистической информации, поступающей с атомных станций, рациональнее использовать непараметрические методы.

Во втором параграфе рассмотрена проблема смещения ядерной оценки плотности распределения неотрицательной случайной величины в области малых наработок. Как известно, ядерная оценка плотности задается формулой:

$$\widehat{f}_{\xi}(t) = \frac{1}{n\sigma} \sum_{i=1}^n V\left(\frac{t - \xi_i}{\sigma}\right), \quad (1)$$

где  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$  – выборка, полученная в результате наблюдения за объектом исследования;  $V(t)$  – ядро предлагаемой оценки;  $\sigma$  – параметр локальности;  $n$  – объём наблюдений.

Пусть исследуемая случайная величина неотрицательна, и ядро в (1) – гауссовское. Тогда в области малых наработок будет присутствовать относительное смещение и, в принципе, не будет выполняться условие нормировки:

$$\int_0^{\infty} \widehat{f}_{\xi}(t) dt < 1.$$

Это связано с тем, что

$$\int_0^{\infty} \widehat{f}(t) dt = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n\sigma} \int_0^{\infty} V\left(\frac{t - \xi_i}{\sigma}\right) dt = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{\xi_i}{\sigma}\right), \quad \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt,$$

где  $\Phi(x)$  – интеграл Лапласа. Поэтому, если существуют  $\xi_i < 3\sigma$ , то может наблюдаться нарушение условия нормировки при малой выборке или при значительной доле  $\xi_i$ , которые удовлетворяют неравенству  $\xi_i < 3\sigma$ .

Для борьбы с этим явлением предложено несколько подходов: использование линейно возрастающих  $\sigma_i$  в области малых наработок, принцип зеркального отображения исходных данных и применение усеченных ядер. На модельной выборке проведено сравнение эффективности предложенных подходов. Результаты тестовых исследований показали, что наилучшая точность оценки достигается применением принципа зеркального отображения данных. Суть



указанного принципа заключается в замене классического ядра  $V\left(\frac{t-\xi_i}{\sigma}\right)$  ядром  $V\left(\frac{t-\xi_i}{\sigma}\right) + V\left(\frac{t+\xi_i}{\sigma}\right)$  в формуле для ядерной оценки плотности распределения.

В третьем параграфе приведена процедура определения оптимального значения параметра локальности ядерной оценки плотности распределения, разработанная с использованием метода максимального правдоподобия. На рис. 1 и 2 приведены результаты применения данной процедуры на примере построения оценки плотности распределения по модельной выборке объёмом  $n=100$ , распределённой по закону Вейбулла ( $W(\beta=2, \lambda=1)$ ). На диаграммах представлены графики оценок плотности при оптимальном значении параметра локальности  $\sigma$  при значении параметра локальности меньшем (рис. 1) и большем (рис. 2) оптимального, а также теоретическая плотность распределения закона Вейбулла ( $f_{\text{теор.}}$ ).

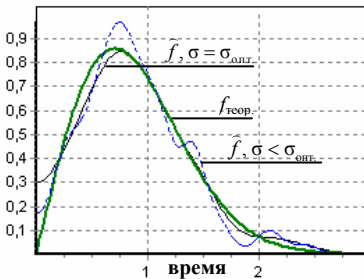


Рис. 1. Ядерная оценка плотности распределения при оптимальном и меньшем оптимального значениях параметра локальности.

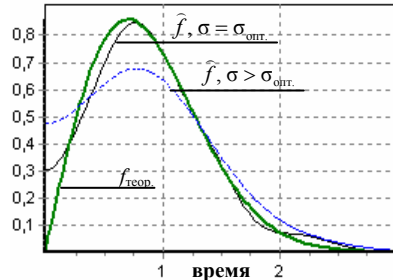


Рис. 2. Ядерная оценка плотности распределения при оптимальном и большем оптимального значениях параметра локальности.

График оценки при  $\sigma < \sigma_{\text{опт}}$  менее гладкий и имеет большее количество выбросов, больший разброс относительно истинного распределения (рис. 1), чем при  $\sigma_{\text{опт}}$ . График оценки при  $\sigma > \sigma_{\text{опт}}$ , являясь более гладким, имеет очевидное смещение, сильнее удалён от истинного значения плотности, нежели при  $\sigma_{\text{опт}}$  (рис. 2). Таким образом, представленные на рисунках результаты оценивания подтверждают известную тенденцию, что при малых  $\sigma$  растёт дисперсия оценки, а при больших – систематическая ошибка.

Четвёртый параграф посвящён повышению качества ядерного оценивания за счет учёта априорной информации. Так как выборки экспериментальных

данных о функционировании анализируемых систем и их составных частей присутствуют в весьма ограниченном объёме, то для получения оценок показателей надёжности этих объектов с высокой степенью достоверности важно использовать всю дополнительную информацию. На основе байесовского подхода и метода моделирования, относящегося к классу перестановочных, так называемого метода Jack Knife (складного ножа), разработана процедура более точного определения оптимального значения параметра локальности по текущим и априорным данным. На рис. 3 и 4 приведены построенные по модельной выборке объёмом 100 наблюдений, распределённой по нормальному закону с параметрами  $m = 5$  и  $d = 1$ , оценки плотности распределения без учёта и с учётом априорной информации (кривые  $\hat{f}$ ). Кривая  $f_{\text{теор.}}$  – теоретическая плотность распределения нормального закона. В качестве ошибки оценивания в работе использовалась ошибка в метрике  $L_1$  – пространства:

$$e = \int_{\Omega} \left| f_{\text{теор.}}(t) - \hat{f}(t) \right| dt, \text{ где } \Omega - \text{область определения наблюдаемого случайного показателя.}$$

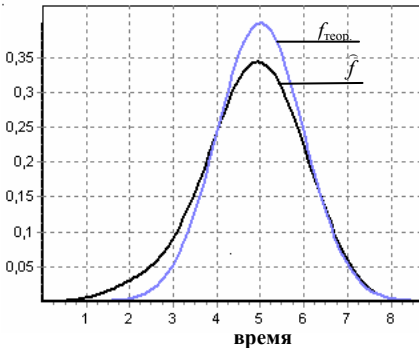


Рис. 3. Ядерная оценка плотности распределения, построенная только по текущей выборке

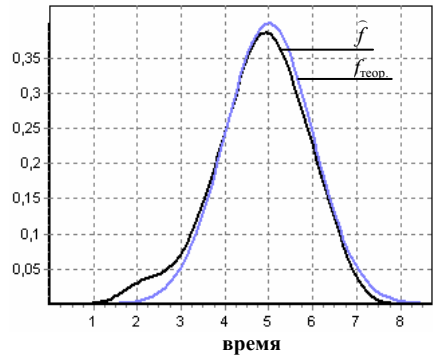


Рис. 4. Ядерная оценка плотности распределения, построенная по текущей и априорной выборке

Результаты исследований разработанного метода показали, что включение в набор данных для построения оценки априорной выборки объёмом 50–100 наблюдений позволяет уменьшить ошибку оценивания в среднем на 5–10%, объёмом 100–200 наблюдений – 10–20%. Данный результат доказывает эффективность предложенного метода.

В пятом параграфе рассмотрена процедура ядерного оценивания плотности распределения по цензурированной выборке. Цензурирование связано с тем,

что в процессе анализа надежности приходится сталкиваться с ситуациями, когда определенная часть объектов или систем не отказывает за период наблюдения, а другая часть отказывает, но моменты отказов точно не известны. Цензурирование – это процесс возникновения неопределенности момента отказа, причем интервал неопределенности считается известным. Этот интервал может быть неограниченным справа, ограниченным справа или ограниченным с обеих сторон. В первом случае говорят, что выборка цензурирована справа, во втором – слева, в третьем – интервалом.

Предположим, что у нас имеется следующая статистическая информация:

$\vec{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_p)$  – массив полных наработок;  $\vec{LR} = [(l_1, r_1); (l_2, r_2); \dots; (l_s, r_s)]$  – массив интервалов, на которых произошло случайное число отказов  $\vec{v} = (v_1, v_2, \dots, v_s)$ . При этом будем предполагать, что  $l_i = 0$ , если  $i$ -ый интервал цензурирован слева и  $r_j = \infty$ , если  $j$ -ый интервал цензурирован справа.

Также очевидно, что  $p + q = n$  – общее число наблюдений, где  $q = \sum_{i=1}^s v_i$  – общее количество цензурированных наблюдений.

Ядерная оценка плотности распределения, учитывающая как полные, так и цензурированные слева либо интервалом данные, имеет следующий вид:

$$\hat{f}_{\xi}(t) = \frac{1}{\sigma n} \left[ \sum_{j=1}^p V \left( \frac{t - \xi_j}{\sigma} \right) + \sum_{j=1}^s v_j \int_0^1 V \left( \frac{t - l_j - u \Delta_j}{\sigma} \right) du \right], \quad (2)$$

где  $\Delta_j$  – длина  $j$ -ого интервала цензурирования.

При цензурировании справа интервалы цензурирования имеют бесконечную правую границу. В этом случае строится ядерная оценка плотности случайной величины, обратной наблюдаемой, которая будет цензурирована слева. Ядерная оценка плотности цензурированной справа случайной величины имеет вид:

$$\hat{f}_{\xi}(t) = \frac{1}{\sigma n} \left[ \sum_{j=1}^p V \left( \frac{t - \xi_j}{\sigma} \right) + \sum_{j=1}^s \frac{v_j}{t^2} \int_0^1 V \left( \left( \frac{1}{t} - \frac{u}{l_j} \right) / \sigma \right) du \right]. \quad (3)$$

На модельных данных, имеющих различные законы распределения, проведены исследования зависимости качества восстанавливаемой плотности от учёта цензурированных данных. Показано, что при доле цензурированной информации в исходной выборке порядка 70% и выше ядерная оценка плотности, учитывающая как цензурированные, так и полные наработки, точнее той же оценки, построенной только по полным данным, в среднем на 25 и более процентов. Если доля цензурированной информации составляет 50–70%, её учёт позволяет уменьшить ошибку оценивания на 20–25%. Если доля цензурированных данных 30–50%, ошибка меньше на 15–20%.

На рис. 5 приведены оценки плотности, построенные с учётом ( $\hat{f}_{\text{ценз.}}$ ) и без учёта ( $\hat{f}$ ) цензурированной информации по модельной выборке объёмом 50 полных и 50 цензурированных интервалом наработок, распределённой по гамма-закону ( $\Gamma(\beta = 1, \lambda = 1)$ ). Кривая  $f_{\text{теор.}}$  – теоретическая плотность распределения гамма-закона.

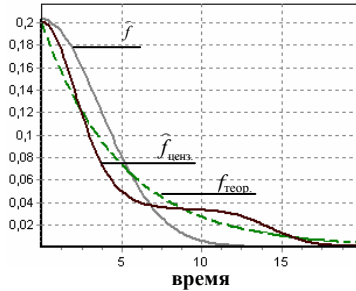


Рис. 5. Ядерная оценка плотности распределения, построенная с учётом и без учёта цензурированной интервалом информации

В шестом параграфе получены алгоритмы расчёта доверительных границ ядерных оценок плотности распределения и интенсивности отказов, построенных по полным и цензурированным наблюдениям.

В седьмом параграфе рассмотрен метод ядерного оценивания параметра потока отказов. Определение показателей надёжности целесообразно начинать с оценки параметра потока отказов в случае, когда исследователю неизвестны наработки до отказа конкретных объектов, а фиксируются только моменты отказов находящейся под наблюдением совокупности однотипных восстанавливаемых элементов.

В **третьей главе** излагаются разработанные проекционные и корневые методы оценки плотности распределения случайного параметра с учётом цензурированной информации.

В первом параграфе сформулирована задача расчёта показателей надёжности объектов АЭС методами проекционного оценивания. Суть проекционного оценивания состоит в разложении неизвестной функции в ряд по некоторому конечному набору ортонормированных базисных функций  $p_i(t)$ :

$$\hat{f}_{\xi}(t) = \sum_{i=0}^N \hat{c}_i p_i(t). \text{ Здесь } N - \text{ число гармоник, } \hat{c}_i - \text{ оценки коэффициентов раз-}$$

ложения по выбранному базису, которые определяются как  $\hat{c}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_i(\xi_j)$ .

Можно записать  $\widehat{f}_\xi$  иначе:  $\widehat{f}_\xi(t) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n K_N(t, \xi_j)$ , где функция

$$K_N(t, y) = \sum_{i=0}^N p_i(t) p_i(y).$$

Впервые проекционный метод оценивания плотности распределения был предложен в работе Ченцова Н. Н., в которой он использовал для получения проекционной оценки разложение функции в ряд Фурье. В настоящей работе рассмотрены и другие системы ортонормированных функций, которые можно использовать для построения проекционной оценки: полиномы Лежандра, ряды Эрмита и Лагерра, система Хаара. Получены их обобщения для произвольной области определения случайного параметра.

Во втором параграфе разработан алгоритм определения оптимального числа гармоник в разложении неизвестной функции в ряд по базису ортонормированных функций.

Третий параграф посвящён проекционному оцениванию плотности распределения случайной величины по цензурированной выборке. Рассмотрена проекционная оценка плотности распределения, учитывающая данные, цензурированные слева и интервалом:

$$\widehat{f}_\xi(t) = \frac{1}{n} \left[ \sum_{j=1}^p K_N(t, \xi_j) + \sum_{i=0}^N p_i(t) \sum_{j=1}^s v_j \int_0^1 p_i(t_j + u \Delta_j) du \right]. \quad (4)$$

Получено выражение для проекционной оценки плотности распределения цензурированных справа наработок:

$$\widehat{f}_\xi(t) = \frac{1}{n} \left[ \sum_{j=1}^p K_N(t, \xi_j) + \sum_{i=0}^N p_i \left( \frac{1}{t} \right) \frac{1}{t^2} \sum_{j=1}^s v_j \int_0^1 p_i \left( \frac{u}{\Delta_j} \right) du \right]. \quad (5)$$

Проведены исследования предложенных методов на модельных данных, результаты которых показали, что при доле цензурированной информации в исходной выборке порядка 70% и выше проекционная оценка плотности, учитывающая как цензурированные, так и полные наработки, точнее той же оценки, построенной только по полным данным, на 55 и более процентов. Если доля цензурированной информации составляет 50–70%, её учёт позволяет уменьшить ошибку оценивания на 33–55 %. Если доля цензурированных данных 30–50%, ошибка меньше на 16–33 %.

В четвёртом параграфе приведен алгоритм расчёта доверительных границ проекционной оценки плотности распределения.

Одним из недостатков классической проекционной оценки плотности распределения с рядом Фурье является то, что на хвостах она может принимать отрицательные значения. В связи с этим в пятом параграфе рассмотрен метод корневой оценки плотности распределения. Суть корневого метода состоит в

том, что вместо разложения искомой плотности предлагается разлагать по ортонормированной системе так называемую пси-функцию  $\psi(t)$ , связанную с искомой плотностью  $f_\xi(t)$  равенством  $f_\xi(t) = |\psi(t)|^2$ . Переход от разложения  $f_\xi(t)$  к разложению  $\psi(t)$  позволяет при применении метода максимального правдоподобия получить эффективную вычислительную схему оценки искомых параметров разложения  $\{c_i\}$ .

Для расчёта коэффициентов  $\{c_i\}$  сформулирована задача нелинейного программирования с ограничениями в виде равенств, которая решена методом множителей Лагранжа. Предложен итерационный процесс для получения оценок коэффициентов разложения:

$$c_i^{l+1} = \alpha c_i^l + (1 - \alpha) \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n P_i(\xi_k) \left( \sum_{j=1}^N c_j^l P_j(\xi_k) \right)^{-1}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  подбирается так, чтобы скорость сходимости итерационного процесса была максимальной.

Результаты проведённого на модельных данных сравнения корневого метода оценивания с классическим проекционным показали, что, будучи положительной на всей области определения, корневая оценка плотности не уступает в точности проекционной.

Разработана процедура для расчёта коэффициентов  $\{c_i\}$  по группированным набороткам:

$$c_i = \frac{1}{2\lambda} \left[ 2 \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^N \frac{\tilde{p}_j(\xi_k) \tilde{p}_i(\xi_k)}{f_\xi(\xi_k)} c_j + \sum_{h=1}^s \frac{v_h}{(\widehat{F}_\xi(r_h) - \widehat{F}_\xi(l_h))} \left( \frac{\partial \widehat{F}_\xi(r_h)}{\partial c_i} - \frac{\partial \widehat{F}_\xi(l_h)}{\partial c_i} \right) \right], \quad (7)$$

$$\text{где } \lambda = p + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N c_i \times \sum_{h=1}^s v_h \frac{\partial \ln(\widehat{F}_\xi(r_h) - \widehat{F}_\xi(l_h))}{\partial c_i}. \quad (8)$$

В качестве оценки функции распределения целесообразно взять интеграл:

$\widehat{F}_\xi(t) = \int_{-\infty}^t \widehat{f}_\xi(u) du$ . Для ортонормированного базиса  $\{\tilde{p}_k(t)\}$ , определённого

на отрезке  $[c, d]$ , оценка функции распределения будет иметь вид:

$$\widehat{F}_\xi(t) = \frac{t-c}{d-c} - \sum_{i=1}^N c_i^2 \left( \frac{\sqrt{d-c}}{2\sqrt{2}i\pi} \tilde{p}_{2i}(t) \right) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N c_i c_j \frac{\sqrt{d-c}}{\sqrt{2}\pi} \left( \frac{\tilde{p}_{i-j}(t)}{i-j} - \frac{\tilde{p}_{i+j}(t)}{i+j} \right). \quad (9)$$

Итерационный процесс для расчёта коэффициентов  $\{c_i\}$  с учётом цензурированных данных будет выглядеть следующим образом:

$$c_i^{l+1} = \alpha c_i^l + \frac{1-\alpha}{2\lambda} \left[ 2 \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^N \tilde{p}_i(\xi_k) (c_j^l \tilde{p}_j(\xi_k))^{-1} + \sum_{h=1}^s \frac{v_h}{(\widehat{F}_\xi^l(r_h) - \widehat{F}_\xi^l(l_h))} \left( \frac{\partial \widehat{F}_\xi^l(r_h)}{\partial c_i} - \frac{\partial \widehat{F}_\xi^l(l_h)}{\partial c_i} \right) \right] \quad (10)$$

Результаты исследования данного метода на модельных данных доказали эффективность учёта цензурированной информации и в случае корневого оценивания. Показано, что при доле цензурированной информации в исходной выборке порядка 70% и выше включение её в набор данных для построения оценки повышает точность оценивания в среднем на 47 и более процентов. Если доля цензурированной информации составляет 50–70%, её учёт позволяет уменьшить ошибку оценивания на 33–47%. Если доля цензурированных данных 30–50%, ошибка меньше на 13–33%.

В шестом параграфе предложен метод проекционного оценивания параметра потока отказов.

**В четвертой главе** приведены результаты анализа характеристик надежности реальных элементов и систем объектов атомной энергетики, выполненные с использованием разработанных методов.

**В первом параграфе** четвертой главы представлен расчет показателей надежности электронасосных агрегатов ЦН 60-180, используемых в системе подпитки и борного регулирования АЭС с реакторами ВВЭР-1000. Анализ надежности проводился в рамках госбюджетной тематики ГБ-1.13 «Системный анализ надёжности и управление ресурсными характеристиками объектов ядерной энергетики на основном и завершающем этапе функционирования» на основе отраслевой базы данных ВНИИАЭС по состоянию на 31.12.2007 г. В рассмотрение включены агрегаты Балаковской АЭС (блоки 1–4), Калининской АЭС (блоки 1,2) и Нововоронежской АЭС (блок 5). Период наблюдения: 01.01.1990 г. – 31.12.2007 г.

Определены границы и назначение устройства. Приведена структурная схема насосов в системе подпитки теплоносителя и борного регулирования первого контура АЭС. Описаны режимы работы системы насосного оборудования. Приведены исходные данные об отказах. Определён порядок проведения анализа надёжности, который строится на принципе последовательного обобщения от индивидуальных показателей до показателей, усредненных по всему рассматриваемому парку оборудования (21 объект).

Построены ядерные и корневые оценки следующих показателей: плотности и функции распределения наработки до отказа, вероятности безотказной работы (ВБР), плотности распределения с учётом цензурирования справа и интен-

сивности отказов. На рис. 6–9 приведены графики указанных характеристик, полученные по данным об отказах насосов системы подпитки и борного регулирования 1–4 блоков Балаковской АЭС методами ядерного оценивания (число элементов находящегося под наблюдением оборудования – 12; объём зафиксированных отказов – 88).

Поведение интенсивности отказов позволило выявить временные интервалы, на которых наблюдается увеличение количества отказов. Более глубокий анализ исходной информации показал, что в ряде данных временных интервалов имеют место доминирующие причины отказов, а именно: в интервале 6–10 тысяч часов отказы обусловлены недостатками технического обслуживания и ремонта; 38–42 тысячи часов – отказами отдельных составных частей насосов. Всплеск интенсивности на временном интервале свыше 80 тысяч часов (конец интервала построения показателей надежности) обусловлен ошибками расчета, возникающими на границе области определения функции интенсивности отказов ввиду малого объема данных об отказах в соответствующий промежуток времени.

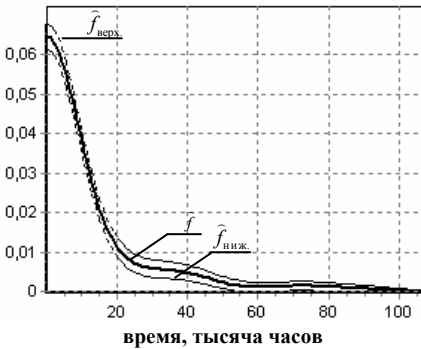


Рис. 6. Ядерная оценка плотности распределения наработки до отказа ( $\hat{f}$ ) с доверительными границами ( $\hat{f}_{\text{ниж}}$  – нижняя граница,  $\hat{f}_{\text{верх}}$  – верхняя граница доверительного интервала), построенная по данным об отказах насосов системы подпитки и борного регулирования Балаковской АЭС

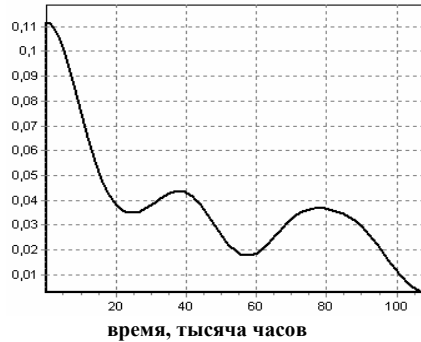


Рис. 7. Ядерная оценка интенсивности отказа, построенная по данным об отказах насосов системы подпитки и борного регулирования Балаковской АЭС



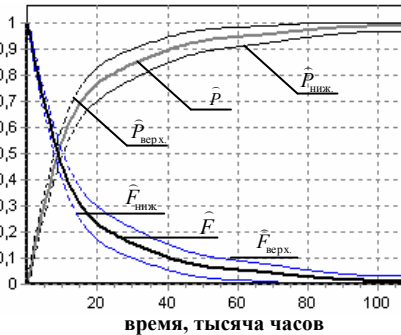


Рис. 8. Ядерная оценка функции распределения наработки до отказа ( $\hat{F}$ ) и ВБР ( $\hat{P}$ ) с доверительными границами ( $[\hat{F}_{\text{ниж}}, \hat{F}_{\text{верх}}]$ ,  $[\hat{P}_{\text{ниж}}, \hat{P}_{\text{верх}}]$ ), построенные по данным об отказах насосов системы подпитки и борного регулирования Балаковской АЭС

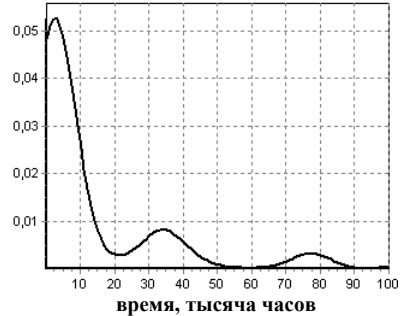


Рис. 9. Корневая оценка плотности распределения наработки до отказа, построенная по данным об отказах насосов системы подпитки и борного регулирования Балаковской АЭС

Проведён анализ показателей надёжности системы насосного оборудования с учётом ЗИП. Результаты расчётов приведены в таблицах 2 и 3. В табл. 4 представлены оценки числа запасных элементов, необходимого для достижения уровня безотказной работы  $P_0 = P(t = 9 \text{ тыс.ч.}) = 10^{-7}$  системы насосного оборудования, рассчитанные для каждого блока в отдельности и по станции в целом.

Используя оценки показателей надёжности, полученные на предыдущих этапах, проведены расчёты коэффициента готовности системы насосного оборудования. График коэффициента готовности имеет монотонно возрастающий характер в зависимости от длительности интервала времени между очередными планово-профилактическими мероприятиями. Этот результат подтвердил гипотезу, выдвинутую сотрудниками ОАО «ВНИИАЭС», о возможности перевода насосного агрегата ЦН 60-180 на «ремонт по состоянию».

Таблица 2

Вероятность отказа системы насосного оборудования Балаковской АЭС при  $t = 9$  тыс.ч. и различном объёме ЗИП

ЗИП	блок 1	блок 2	блок 3	блок 4	по всем
1	0,00183	0,00202	$10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	0,00076
2	$5,32 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$
3	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	–	–	$10^{-7}$
4	$10^{-7}$	$10^{-7}$	–	–	$10^{-8}$

Таблица 3

Вероятность отказа системы насосного оборудования Калининской АЭС, Нововоронежской АЭС и всей отрасли при  $t=9$  тыс.ч. и различном объёме ЗИП

ЗИП	Калининская АЭС			Нововоронежская АЭС	По отрасли
	Блок 1	Блок 2	По всем	Блок 5	
1	0,00627	0,01404	0,00983	0,000118	0,001135
2	0,00028	0,00096	0,00052	$10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$
3	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$
4	$10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	–	$10^{-7}$
5	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	–	–

Таблица 4

Число запасных элементов, необходимых для достижения уровня безотказной работы  $P_0=P(t=9 \text{ тыс.ч.})=10^{-7}$

Число элементов ЗИП									
Балаковская АЭС					Калининская АЭС			Нововоронежская АЭС	По отрасли
Блок 1	Блок 2	Блок 3	Блок 4	По всем	Блок 1	Блок 2	По всем	Блок 5	
4	4	2	2	3	5	5	5	3	4

**Во втором параграфе** четвёртой главы получены характеристики надёжности переключателей и датчиков расхода, уровня и давления энергоблоков с PWR900MW и PWR1300MW АЭС Франции. Данная работа выполнялась в рамках соглашения о сотрудничестве между ИАТЭ и Международной сетью по использованию ВАБ для оценки воздействия старения на безопасность энергетических установок (EC JRC Ageing PSA Network).

В диссертации приведено описание исследуемых устройств, особенности их функционирования, исходные данные об отказах переключателей за период наблюдений 01.01.1990–01.01.1998 (8 лет) и данные об отказах датчиков за период наблюдений 01.01.1990–01.01.1999 (9 лет).

По данным об отказах переключателей и датчиков давления, расхода и уровня построены ядерные и корневые оценки характеристик надёжности для групп, в которые по различным критериям были объединены приборы. На рис. 10–13 приведены оценки показателей надёжности датчиков давления энергоблоков PWR 900MWe. Число прибор под наблюдением – 31. Число отказов, зафиксированное за период 01.01.1990–01.01.1999, – 98.

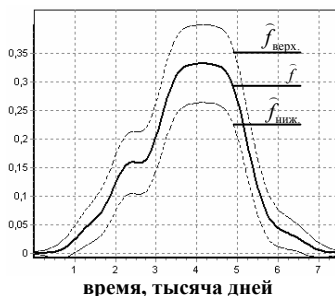


Рис. 10. Ядерная оценка плотности распределения наработки до отказа ( $\hat{f}$ ) с доверительными границами ( $\hat{f}_{\text{ниж}}$  – нижняя граница,  $\hat{f}_{\text{верх}}$  – верхняя граница доверительного интервала), построенная по данным об отказах датчиков давления.

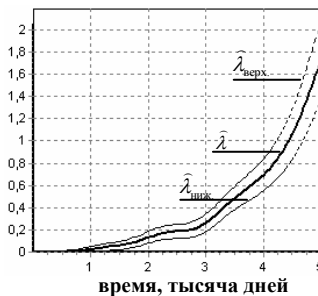


Рис. 12. Ядерная оценка интенсивности отказа ( $\hat{\lambda}$ ) с доверительными границами ( $\hat{\lambda}_{\text{ниж}}$  – нижняя граница,  $\hat{\lambda}_{\text{верх}}$  – верхняя граница доверительного интервала), построенная по данным об отказах датчиков давления.

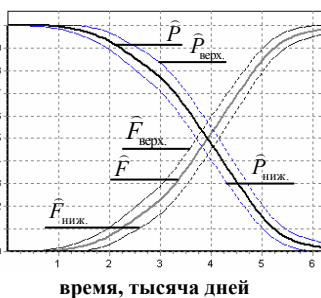


Рис. 11. Ядерные оценки функции распределения ( $\hat{F}$ ) и ВБР ( $\hat{P}$ ) с доверительными границами ( $[\hat{F}_{\text{ниж}}, \hat{F}_{\text{верх}}]$ ,  $[\hat{P}_{\text{ниж}}, \hat{P}_{\text{верх}}]$ ), построенные по данным об отказах датчиков давления.

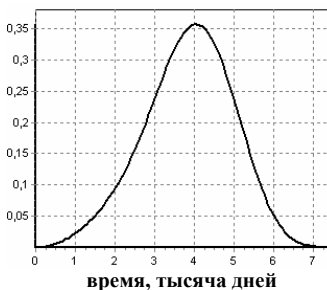


Рис. 13. Корневая оценка плотности распределения наработки до отказа, построенная по данным об отказах датчиков давления.

Энергоблоки имеют разные даты начала функционирования, и период наблюдений охватывает различные годы календарного времени их эксплуатации. За дату начала работы оборудования принята дата начала работы энергоблока, которому оно принадлежит.

При построении характеристик надёжности ось астрономического времени привели к оси времени функционирования энергоблоков, сведя в начало коор-

динат даты ввода их в эксплуатацию. В результате получили данные об отказах однотипных приборов на протяжении всего их срока службы. В этом случае по поведению кривой интенсивности отказов можно судить о наличии старения оборудования.

Распределение наработок до отказа наблюдаемых приборов, как датчиков давления, так и датчиков других типов, имеет возрастающую функцию интенсивности. Этот результат позволяет сделать вывод о том, что мы имеем дело с оборудованием стареющего типа.

В **заключении** представлены основные результаты проделанной работы.

Разработан системный подход к анализу надежности оборудования АЭС непараметрическими методами, в основе которого лежат следующие результаты:

1. Сформулирована проблема повышения достоверности расчетов оценивания характеристик надежности оборудования АЭС за счёт учёта цензурированной информации, полученной из опыта функционирования, и априорной информации об эксплуатации объектов-аналогов. Проведен анализ существующих источников по данной проблеме.
2. Разработаны непараметрические методы анализа характеристик надёжности объектов энергоблоков АЭС с учётом информации, цензурированной справа, слева и интервалом. Проведено исследование разработанных методов на модельных данных. Выявлена зависимость эффективности ядерного и проекционного оценивания от параметров исходной информации.
3. Разработаны процедуры определения оптимальных значений параметров, влияющих на качество ядерной и проекционной оценок плотности распределения наработок до отказа, алгоритмы построения доверительных интервалов для указанных оценок как по полным, так и по цензурированным данным, а также метод учёта априорной информации при расчёте характеристик надёжности исследуемых объектов.
4. Получен метод проекционной оценки параметра потока отказов, позволяющий проводить анализ надёжности в ситуации, когда исследователю неизвестны наработки до отказа конкретных объектов, а фиксируются только моменты отказов находящейся под наблюдением совокупности однотипных восстанавливаемых элементов. Проведены исследования разработанного проекционного и ядерного методов оценивания параметра потока отказов.
5. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для обработки данных об отказах систем и объектов АЭС и расчёта их характеристик надежности, таких как плотность распределения, ВБР, интенсивность отказов и др. Проведена его апробация на тестовых примерах и реальных данных.
6. Проведены расчеты характеристик надежности насосного оборудования системы подпитки и борного регулирования АЭС с ВВЭР-1000 концерна «Энергоатом». Рассчитан объём ЗИП, необходимый системе насосного оборудования подпитки и борного регулирования для обеспечения её бесперебойно-

го функционирования. Построена оценка коэффициента готовности, которая позволила сделать вывод о возможности обслуживания насосных агрегатов ЦН 60-180 по состоянию. Полученные результаты по оценке характеристик надёжности насосных агрегатов ЦН 60-180 использовались при подготовке управляющих решений сотрудниками ВНИИАЭС.

7. Проведён анализ надёжности переключателей и датчиков расхода, уровня и давления энергоблоков с PWR900MW и PWR1300MW АЭС Франции. Полученные результаты позволили сделать вывод о наличии эффекта старения в работе данного оборудования, так как функция интенсивности отказов имеет ярко выраженную тенденцию роста в зависимости от времени эксплуатации.

### **Основные публикации по теме диссертации**

1. **Антонов А.В.** Исследование метода ядерной оценки плотности распределения / А.В. Антонов, В.А. Чепурко, Н.Г. Зюляева // Надёжность. – 2007. – № 1. – С. 3–12.
2. **Антонов А.В.** Результаты исследования метода вейвлет-оценки плотности распределения / А.В. Антонов, В.А. Чепурко, Н.Г. Зюляева // Надёжность. – 2007. – № 4. – С. 19–29.
3. **Антонов А.В.** Исследование метода ядерной оценки плотности распределения / А.В. Антонов, В.А. Чепурко, Н.Г. Зюляева // Диагностика и прогнозирование состояния сложных систем: сб. науч. трудов №16 кафедры АСУ.– Обнинск: ИАТЭ, 2006. – С. 9–23.
4. **Антонов А.В.** Исследование метода проекционной оценки плотности распределения / А.В. Антонов, В.А. Чепурко, Н.Г. Зюляева // Диагностика и прогнозирование состояния сложных систем: сб. науч. трудов №17 кафедры АСУ.– Обнинск: ИАТЭ, 2007. – С. 3–15.
5. **Антонов А.В.** Статистический анализ эксплуатационной надёжности электронасосных агрегатов ЦН 60-180 реакторов ВВЭР-1000 методами ядерного оценивания/ Антонов А.В., Зюляева Н.Г., Чепурко В.А., Белоусов А.Я., Таратунин В.В.// Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – №3. – С. 5–14.
6. **Антонов А.В.** Разработка и исследование непараметрических методов расчёта показателей надёжности / А.В. Антонов, Н.Г. Зюляева, В.А. Чепурко // Безопасность АЭС и подготовка кадров: тез. докл. IX Международной конференции, Обнинск, 24–28 октября, 2005 г. – Обнинск: ИАТЭ, 2005. – Ч. 2 – С. 52–54.
7. **Антонов А.В.** Разработка и исследование непараметрических методов оценки надёжности энергоблоков АЭС / А.В. Антонов, Н.Г. Зюляева, В.А. Чепурко // Безопасность АЭС и подготовка кадров: тез. докл. X Международной конференции, Обнинск, 1–4 октября, 2007 г. – Обнинск: ИАТЭ, 2007. – Ч. 1. – С. 132–133.
8. **Антонов А.В.** Расчёт характеристик надёжности оборудования АЭС методами корневого оценивания / А.В. Антонов, Н.Г. Зюляева, В.А. Чепурко // Безопасность АЭС и подготовка кадров: тез. докл. XI Международной конфе-

ренции, Обнинск, 29 сентября – 2 октября 2009 г. – Обнинск: НОУ «ЦИПК», 2009. – Т. 2. – С. 49–50.

9. **Зюляева Н.Г.** Исследование метода построения плотности распределения с использованием ядерных функций / Н.Г. Зюляева // Математические идеи П.Л. Чебышева и их приложение к современным проблемам естествознания: тез. докл. II Международной конференции, Обнинск, 26–29 ноября 2004 г. – Обнинск: ИАТЭ, 2004. – С. 40–41.

10. **Зюляева Н.Г.** Разработка и исследование непараметрических методов расчёта показателей надёжности / Н.Г. Зюляева // Математические идеи П.Л. Чебышева и их приложение к современным проблемам естествознания: тез. докл. III Международной конференции, Обнинск, 14–18 мая 2006 г. – Обнинск: ИАТЭ, 2006. – С. 32–33.

11. **Antonov A.** The Statistical Analysis of Operating Reliability of Electropump Units CN 60-180 For Reactors VVER-1000 by Root Estimation Methods / A. Antonov, N. Zyulyaeva, V. Chepurko, A. Belousov, V. Taratunin // Mathematical methods in reliability: Proceedings of sixth international conference, Moscow, June 22–27, 2009. – P. 521–525.

Компьютерная верстка Н.Г. Зюляева

---

ЛР № 020713 от 27.04.1998

---

Подписано к печати

Формат бум. 60x84/16

Печать ризограф.

Бумага МВ

Печ. л. 1,5

Заказ №

Тираж 100 экз.

Цена договорная

---

Отдел множительной техники ИАТЭ  
249035, г.Обнинск, Студгородок 1