

На правах рукописи

**Соболев Артем Владимирович**

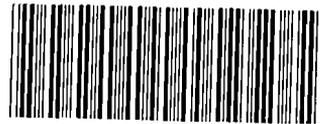
**УЧЕТ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИ ОЦЕНКАХ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ  
РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ПРИМЕНЕНИЕМ  
ВЕРОЯТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность 05.14.03 – ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

2 НОЯ 2016

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

Автор:



**006659413**

Обнинск-2016

Диссертационная работа выполнена в Обнинском институте атомной энергетики — филиале  
НИЯУ МИФИ (ИАТЭ НИЯУ МИФИ)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Волков Юрий Васильевич, ИАТЭ НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты:

кандидат технических наук,

Самохин Дмитрий Сергеевич, ИАТЭ НИЯУ МИФИ

Былов Игорь Александрович, кандидат технических наук, начальник отдела надежности АО "ОКБМ Африкантов"

Ершов Геннадий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, начальник управления технического анализа параметров жизненного цикла АЭС дирекции по управлению параметрами жизненного цикла АЭС АО «НИ АЭП»

Ведущая организация:

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Защита состоится «30» ноября 2016 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 212.130.04 при Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ», 115409, г. Москва, Каширское ш., 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на web-сайте [nph.ru](http://nph.ru)

Автореферат разослан «20» октября 2016 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор физико-математических наук,  
профессор



Чернов И.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Данные по надежности оборудования ЯЭУ получают на основании испытаний или опыта эксплуатации, физико-статистических моделей, экспертных опросов. Специалистами признается, что более предпочтительными и достоверными источниками данных для оценки параметров надежности являются результаты испытаний или опыта эксплуатации. Однако статистика по отказам на атомных станциях (АС) зачастую недостаточна для оценки показателей надежности конкретных элементов. Показатели надежности, полученные при заводских испытаниях, не отражают реальную надежность элементов в условиях эксплуатации на АС.

Анализ зарубежного и отечественного опыта эксплуатации показал, что 50—70% всех происшествий на АС, если и не инициировалась ошибками персонала, то сопровождалась ими. Если с методическим обеспечением анализа опыта эксплуатации для оценки показателей надежности оборудования ситуация более или менее благополучна, то оценка надежности персонала по данным эксплуатации является нетривиальной задачей. Более сложной задачей является оценка вероятностей ошибок персонала, инициирующих аварийную ситуацию.

Современные методики анализа надежности персонала (АНП), используемые в мировой практике, рассматривают человека-оператора или коллектив с точки зрения наук о человеке. Это, как оказалось, не оправдывает себя для случаев, когда необходимы количественные, а не качественные показатели. А в отношении инициирующих ошибок персонала необходимо еще учитывать зависимость их вероятности от времени, что невозможно в большинстве известных методик. Поэтому задача разработки методики получения данных по надежности оборудования и персонала в виде параметров законов распределения вероятностей на основании данных эксплуатации АС является *актуальной*. Это позволяет, в том числе, использовать полученные данные для оценки вероятности инициирующих отказов персонала.

Использование отраслевого опыта эксплуатации в исследованиях безопасности реакторных установок (РУ) не ограничивается выполнением оценок по-

казателей надежности (оборудования или персонала) для исследований безопасности. Сегодня много внимания уделяется инструментам для помощи в принятии управленческих решений. Поэтому в качестве примера приводится предложенный автором способ принятия таких решений на основании анализа данных отраслевого опыта эксплуатации и данных конкретной АЭС.

В диссертационной работе исследован отраслевой опыт эксплуатации российских АС за период с 1.01.1995 по 6.09.2007 г. При анализе этих сведений была выполнена классификация происшествий и сформированы выборки, соответствующие выделенным типам. Для каждой выборки произведен выбор закона распределения и выполнена оценка его параметров двумя независимыми методами.

**Объектом исследования** является надежность персонала и оборудования российских РУ.

**Предметом исследования** являются вероятностные характеристики случайных потоков нарушений на отечественных РУ.

**Целью исследования** явилось получение оценок показателей надежности, основанных на сведениях из опыта эксплуатации отечественных РУ.

В соответствии с поставленной целью решены следующие задачи:

- выполнена классификация происшествий на РУ;
- выбран закон распределения случайного времени между происшествиями на РУ, который позволил интерпретировать многопричинность происшествий; выполнив при этом проверку его обоснованности, опираясь на данные опыта эксплуатации отечественных энергоблоков;
- разработаны два принципиально разных метода оценки параметров законов, описывающих случайные потоки происшествий на РУ, и выполнено сравнение результатов, полученных этими методами, что позволило повысить достоверность полученных оценок.

Исследования и анализ результатов выполнены с использованием следующих методов: математической статистики (для обработки сведений о происше-

ствиях на АС); имитационного моделирования эволюционных процессов; теории вероятности и теории надежности (для построения моделей).

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

- впервые получены оценки надежности персонала РУ России, основанные на опыте эксплуатации отечественных энергоблоков;
- впервые представлено практическое обоснование оптимальности использования распределения Вейбулла для описания распределения времени между происшествиями на РУ;
- разработана методика для получения оценок надежности персонала РУ по данным опыта эксплуатации ЯЭУ, которая дополнительно позволяет выполнять анализ достоверности полученных величин.

**Достоверность научных положений** обеспечивается:

- использованием широко распространенных и апробированных методов и алгоритмов теории вероятностей и математической статистики;
- согласованностью результатов, полученных разными методами;
- использованием опыта эксплуатации российских РУ.

**Практическая значимость и область применения результатов** исследования:

- полученные результаты, учитывающие специфичные для российских АС особенности, могут быть использованы в исследованиях безопасности отечественных РУ;
- полученные результаты могут быть использованы при принятии управленческих решений для учета фактической надежности РУ;
- разработанные методы для количественного анализа опыта эксплуатации РУ позволяют учитывать специфику редких событий, которая характерна для происшествий на РУ;
- практическое обоснование оптимальности применения распределения Вейбулла для времени между происшествиями на РУ позволяет существенно

повысить согласованность результатов исследований безопасности РУ с опытом эксплуатации.

**Личный вклад автора.** Автор работы принимал непосредственное участие в решении задач, изложенных в диссертации, разработал методики и алгоритмы для проведения расчетов. Так, в частности, разработана модель генетического алгоритма для расчета оценок параметров случайных потоков происшествий; усовершенствован метод моментов для расчета оценок параметров двухпараметрических законов распределений случайных величин; разработан пример методики принятия управленческих решений по результатам анализа опыта эксплуатации.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Практическое обоснование того, что при оценках показателей надежности и безопасности АС оптимальным для описания потока происшествий является распределение Вейбулла, а также результаты оценки параметров этого распределения для потоков происшествий различного типа на российских РУ.

2. Полученные данные по надежности персонала для российских АС, основанные на сведениях опыта их эксплуатации, которые позволяют выполнять исследования безопасности РУ с учетом человеческого фактора, в том числе оценивать вероятности исходных событий аварий из-за ошибок персонала.

3. Предложенная методика для получения оценок показателей надежности персонала РУ по данным опыта эксплуатации, включающая вновь разработанные и усовершенствованные для этой цели методы и алгоритмы, позволяющая не только получать оценки надежности, но и анализировать достоверность полученных величин.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы апробированы на следующих международных и российских конференциях: VI Международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», г. Москва, ОАО «Концерн "Росэнергоатом"», 2008 г.; XV семинар по проблемам физики реакторов «Актуальные проблемы физики ядерных реакторов – эффективность, безопасность, нерас-

пространение», Волга-08, МИФИ, 2008 г.; Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010; Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых – «Энергия-2016». г. Иваново, ФГБОУ ВО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2016.

**Публикации.** Автор имеет 28 печатных работ, в том числе по теме диссертации 7 работ, включая 3 статьи в журналах из перечня ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Диссертация изложена на 132 страницах, включая 15 рисунков, 20 таблиц и список цитируемой литературы из 101 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность учета опыта эксплуатации в оценках показателей надежности и безопасности реакторных установок с применением вероятностных моделей. Сформулированы цели, задачи, научная новизна и практическая значимость диссертационного исследования. Сформулированы положения, выносимые автором на защиту.

**В первой главе** (обзорной) рассмотрено влияние персонала на безопасность АС. Здесь приводятся различные классификации ошибок персонала. В главе рассматриваются также две наиболее распространенные методики 2-го поколения для анализа надежности персонала при выполнении своих функций при эксплуатации РУ. Представлен раздел, посвященный выбору источника данных опыта эксплуатации АС. Рассмотрены различные варианты решения задачи аппроксимации закона распределения безотказности по данным опыта эксплуатации АС. Выполнен анализ гипотез о физической природе случайного потока отклонений от нормальной эксплуатации АС. Приведен также ряд проблем статистической обработки данных. Так, например, имеется неопределенность в выборе количества интервалов группировки (разрядов) при построении гистограмм распределений случайных величин.

Обзор существующих методик анализа надежности персонала и рекомендаций МАГАТЭ показал их существенные недостатки, главным из которых является слабая согласованность результатов анализа с опытом эксплуатации. Отмечено, что общепринятая основа для разработки методик анализа надежности персонала РУ базируется на гуманистическом подходе. Именно это ставит под вопрос возможность разработки методики, позволяющей количественно оценить надежность персонала АС. Приведены некоторые примеры различий в существующих методах анализа надежности персонала АС. Показана необоснованность допущений, заложенных в современные методики анализа надежности персонала АС.

**Во второй главе** приведена методика оценок параметров случайных потоков происшествий на АС по данным опыта эксплуатации. Представлена клас-

сификация происшествий на АС по типам отказов и ошибок персонала, рассмотрены вопросы, касающиеся метода разработки классификации отказов оборудования и персонала АС.

Для анализа происшествий на российских АС принято разделение их на следующие типы:

1. Все происшествия.
2. Происшествия при эксплуатации энергоблоков.
3. Происшествия во время ремонтов (ППР) и пусков сразу после них.
4. Происшествия, причиной которых были технические отказы оборудования.
5. Происшествия, причиной которых были ошибки эксплуатационного персонала.
6. Происшествия, которые сопровождались ошибками эксплуатационного персонала.
7. Происшествия, в которых проявились ошибки персонала типа «ошибка считывания информации».
8. Происшествия, в которых проявились ошибки персонала типа «ошибка диагностирования».
9. Происшествия, в которых проявились ошибки персонала типа «ошибка при принятии решения».
10. Происшествия, в которых проявились ошибки персонала типа «ошибка при действиях, реализующих решение».

Рассмотрены физические предпосылки для выбора закона распределения времени между происшествиями на АС. Обоснован выбор в качестве закона распределения, описывающего случайное время до реализации происшествия выделенного типа, распределения Вейбулла

$$f(t) = \rho \cdot \alpha \cdot (\rho \cdot t)^{\alpha-1} \cdot e^{-(\rho \cdot t)^\alpha}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – фактор формы;  $\rho$  – параметр распределения, размерность которого обратна размерности времени  $t$ .

Дано описание метода построения гистограмм редких явлений (таких как происшествия на АС). Так, наиболее простой и часто используемый метод по-

строения гистограмм заключается в разбиении выборки  $t_i, i = 1, \dots, N$  с размахом  $[t_1, t_N]$  на  $k$  равных интервалов  $\Delta t$  значений случайной величины (разрядов). Так, выборка  $t_1, t_2, \dots, t_N$  объема  $N$  из непрерывной случайной величины  $t$  с размахом  $[t_{\min}, t_{\max}]$  разбивается на  $k-2$  интервала равной ширины:

$$\Delta t = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{k - 2}$$

Каждому  $i$ -му разряду ставится в соответствие оценка плотности распределения

$$\tilde{f}_i(\tilde{t}_i) = \frac{\Delta \tilde{P}(\tilde{t}_i)}{\Delta t}, \quad (2)$$

где  $\Delta \tilde{P}(\tilde{t}_i) = n_i / N$  является оценкой вероятности (частоты) того, что случайная величина  $t$  реализуется в  $i$ -м разряде,  $n_i$  — число выборочных значений, попавших в  $i$ -й разряд ( $n_1 = n_N = 0$ ),  $\tilde{t}_i$  — середина  $i$ -го разряда. Использование приведенной методики (условно названной методикой «равнодлинных» разрядов) для построения гистограмм редких или близких к ним событий приводит к появлению затруднительных ситуаций, проявляющихся в появлении нулевых (пустых) разрядов. Пустые разряды при построении гистограмм случайных величин могут наблюдаться по двум причинам:

- случайная группировка выборочных значений в остальных разрядах (случайные величины непрерывны);

- на самом деле выборочные значения представляют результат наблюдения нескольких «экспериментов», т.е. случайная величина принимает значения на непересекающихся отрезках числовой прямой.

Для случая, когда пустые разряды образуются из-за случайной группировки выборочных значений случайной величины в других разрядах, существует методика, позволяющая исключить появление пустых разрядов. Суть этой методики заключается в том, что постоянной величиной принимается не ширина разряда  $\Delta t$ , а количество выборочных значений  $n$ , попавших в каждый разряд, на основании чего определяется  $\Delta t_j$  для каждого разряда. Далее строится кусочно-гладкая функция  $\hat{f}(\tilde{t}_j) = \frac{n}{N \cdot \Delta t_j}$ . Однако, такая методика построения гисто-

грамм в некоторых случаях приводит к группировке существенной части выборки в нескольких разрядах. Для таких ситуаций автором диссертации предложен обобщенный метод построения гистограмм редких событий. Принцип, положенный в основу обобщения, заключается во введении ограничения снизу на число  $n_i$ , т.е. ограничения наименьшего числа ( $n_{\min}$ ) элементов выборки  $i$  в разряде. Необходимо, однако, отметить, что предложенная методика построения гистограмм не позволяет заранее определить количество разрядов гистограммы, а это является важным.

Рекомендации современной статистической теории по выбору количества разрядов неоднозначны. Существенно то, что при разном количестве разрядов в гистограмме различаются значения рассчитанных по ней параметров и критерия согласия. От количества разрядов, а значит и от  $n_{\min}$ , зависит доверительный интервал принятия гипотез о согласованности выборочного распределения с теоретическим.

Когда нет никакой определенной связи между  $n_{\min}$  и точностью и/или значениями параметров распределения Вейбулла, одним из решений может быть построение набора гистограмм со значениями  $n_{\min}$  от максимально до минимально возможных. Далее может быть реализовано два варианта:

- нахождение такой гистограммы и значений параметров  $\alpha$  и  $\rho$ , для которых критерий согласия (критерий Колмогорова или критерий  $\chi^2$ -Пирсона) принимает минимальное значение;

- определение значений параметров  $\alpha$  и  $\rho$  как средневзвешенной суммы значений оценок  $\alpha$  и  $\rho$  по всем гистограммам, со специально подобранными весами.

Последний вариант позволяет получать значения оценок параметров, устойчивых к преобразованиям вариационных рядов, и потому является предпочтительнее первого. Оба варианта позволяют устранить неоднозначность, связанную с определением количества разрядов для построения гистограмм.

На основании данных, полученных в результате расчета оценок параметров закона распределения для каждой гистограммы, т.е. для каждого значения  $n_{\min}$ , средневзвешенная оценка параметра определяется как

$$x = \sum_{i=1}^n p_i \cdot x_i. \quad (3)$$

Здесь,  $x_i$  – значение оцениваемого параметра, определенного по  $i$ -ой гистограмме;  $p_i$  – вес  $i$ -го значения;  $n$  – количество гистограмм с разными значениями  $n_{\min}$ .

Вес  $x_i$  определялся как

$$p_i = \frac{(S_i)^{-1}}{\sum_{j=1}^n (S_j)^{-1}}, \quad (4)$$

где  $S_i$  – значение используемого критерия согласия для  $i$ -ой гистограммы с соответствующим значением  $n_{\min}$ , а, следовательно, количеством разрядов  $k$ .

Здесь же приводится разработанная модель генетического алгоритма для расчета численных значений параметров многопараметрических законов распределения при анализе данных опыта эксплуатации АС.

В качестве рабочих органов/процессов в генетических алгоритмах выступают два механизма (мутация и скрещивание) и функция приспособленности (рисунок 1). Отличие между механизмами скрещивания и мутации заключается в том, что скрещивание «выравнивает» популяцию по значениям функции приспособленности, а мутация разнообразит (произвольно искажает по значениям функции приспособленности) популяцию.



Рис. 1. Принципиальная схема генетического алгоритма

В разработанной модели в качестве хромосомы выступает строка, включающая три гена-параметра:

$$[\rho, \alpha, n_{\min}], \quad (5)$$

где  $\rho$  – параметр потока;  $\alpha$  – фактор формы;  $n_{\min}$  – наименьшее число элементов выборки для формирования разряда гистограммы.

Функция приспособленности задана модификацией  $\chi^2$ –критерия Пирсона и рассчитывается как

$$SVS = \sum_{i=1}^k \Delta t_i \cdot \frac{(f_i^T - f_i^E)^2}{f_i^T}. \quad (6)$$

Здесь  $k$  – количество разрядов в гистограмме с конкретным  $n_{\min}$ ;  $\Delta t_i$  – ширина  $i$ -го разряда;  $f_i$  – теоретическое и экспериментальное значение плотности распределения в середине  $i$ -го разряда.

Здесь же приводится метод, который назван «обобщенный метод моментов». Этот метод позволяет существенно упростить расчет параметров потока происшествий на АС для ряда распределений и является дополнительным к генетическому алгоритму. Идея метода аналогична используемой в методе моментов. Так, в разработанном методе для получения оценок используются первый начальный момент (среднее время между событиями) и коэффициент вариации, который по своей сути является совместной характеристикой двух первых моментов. Далее, расчет можно представить следующей схемой

$$\alpha = h(\theta, r) \rightarrow \rho = g(\theta, \alpha). \quad (7)$$

Здесь  $\alpha$  – фактор формы,  $r$  – коэффициент вариации,  $\theta$  – среднее время между событиями,  $\rho$  – интенсивность событий,  $h(\theta, r)$  и  $g(\theta, \alpha)$  – функции определяемые законом распределения.

В заключении главы сформулированы требования для проверки результатов количественного анализа опыта эксплуатации АС.

В третьей главе содержатся результаты анализа опыта эксплуатации российских АС за период с 1.01.1995 по 6.09.2007 г, содержащего информацию о

211 происшествиях. В связи с тем, что рассматривался не один энергоблок, интервалы времени между происшествиями, происходившими на энергоблоках, приведены в реактор-сутках. Вся временная шкала составила 127110 реактор-суток. Численные результаты, полученные с помощью генетического алгоритма, сравниваются с результатами обобщенного метода моментов.

Пример результатов расчета с помощью разработанной модели генетического алгоритма (5) – (6) представлен в таблице 1. Эти данные содержат набор оптимальных значений параметров распределения (1) для набора гистограмм, отличающихся значением  $n_{\min}$ .

Таблица 1

Результат анализа происшествий на российских АС, произошедших по причине ошибочных действий персонала

Минимальное количество элементов в разряде $n_{\min}$	Функция приспособленности $SYS$	Параметр потока событий $\rho$ , $(p \cdot c.)^{-1}$	Фактор формы распределения Вейбулла $\alpha$
2	0,103	0,000587	0,720
3	0,114	0,000559	0,745
4	0,085	0,000518	0,757
5	0,093	0,000518	0,749
6*	0,143	0,000508	0,7454
7*	0,264	0,000495	0,709
8*	0,127	0,000485	0,829
9*	0,201	0,000508	0,774
10*	0,239	0,00036	0,816

\* - количество разрядов меньше 7.

С использованием предложенных методик получены оценки параметров распределения Вейбулла, описывающего случайные интервалы времени между

происшествиями рассматриваемых типов. Эти данные представлены в таблице 2 для результатов полученных с помощью модели генетического алгоритма (2) – (6), и таблице 3 – для альтернативного метода, основанного на методе моментов (7). На рисунке 2 приведен пример гистограммы и теоретического распределения Вейбулла для происшествий типа «все происшествия». Важно отметить, что гистограммы распределений времени между происшествиями, в которых зафиксированы ошибки персонала типов «диагностика состояния», «принятие решения» и «действие, реализующее решение», не строились из-за очень малой статистики по этим типам.

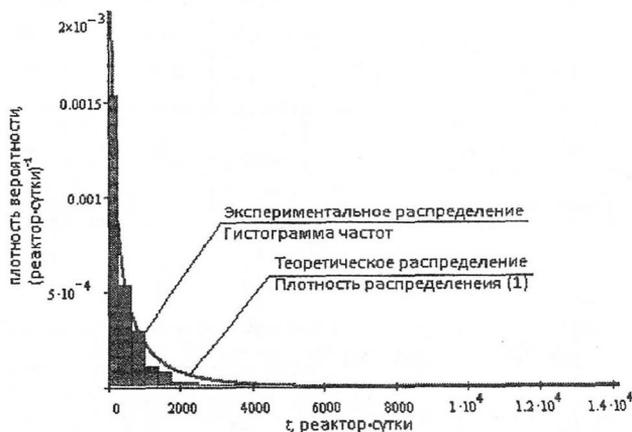


Рисунок 2. Гистограмма и теоретическое распределение интервалов времени между происшествиями всех типов на российских АС

Важно отметить, что полученные оценки параметров, рассчитанные двумя методами (обобщенным методом моментов и с помощью модели генетического алгоритма), совпадают в пределах погрешностей, т.е. имеют области общих значений на краях стандартных отклонений.

Таблица 2

Сводная таблица результатов расчета с помощью модели генетического алгоритма

Тип происшествия	Число событий (k)	$\alpha$	$\sigma_\alpha$	$\rho, 10^{-3} 1/(\text{р}\cdot\text{с})$	$\sigma_\rho, 10^{-3} 1/(\text{р}\cdot\text{с})$
Все происшествия	211	0,662	0,049	1,77	0,45
Происшествия при эксплуатации энергоблоков	141	0,705	0,067	1,14	0,30
Происшествия во время ремонтов (ППР) и пусков сразу после них	70	0,710	0,106	0,66	0,21
Происшествия, причиной которых были технические отказы оборудования	153	0,640	0,078	1,48	0,21
Происшествия, причиной которых были ошибки эксплуатационного персонала	58	0,758	0,037	0,52	0,054
Происшествия, которые сопровождалась ошибками эксплуатационного персонала	92	0,722	0,09	0,78	0,02
Происшествия, в которых проявились ошибки персонала типа «ошибка считывания информации»	31	0,949	0,49	0,25	0,21

В таблице  $\alpha$  и  $\rho$  – параметры распределения (1);  $\sigma_\alpha$  и  $\sigma_\rho$  – стандартные отклонения распределения (1).

Таблица 3

Результаты оценок параметров распределений времени между происшествиями различных типов обобщенным методом моментов

Тип происшествия	$\rho_{\min} \cdot 10^3 1/(\text{р}\cdot\text{с})$	$\rho \cdot 10^3 1/(\text{р}\cdot\text{с})$	$\rho_{\max} \cdot 10^3 1/(\text{р}\cdot\text{с})$	$\alpha_{\min}$	$\alpha$	$\alpha_{\max}$
Все происшествия	2,10	2,81	3,82	0,501	0,552	0,624
При эксплуатации	1,21	1,61	2,18	0,553	0,619	0,714
При ППР	0,562	0,887	1,49	0,49	0,575	0,72
Из-за технических отказов	1,4	1,951	2,77	0,506	0,566	0,659
Из-за ошибок персонала	0,411	0,574	0,847	0,603	0,709	0,881
Сопровождающиеся ошибками персонала	0,75	1,082	1,63	0,525	0,604	0,727
Считывание информации	0,199	0,264	0,376	0,748	0,911	1,194
Диагностика	0,079	0,113	0,185	0,743	0,976	1,488
Принятие решения	0,112	0,153	0,231	0,779	0,994	1,42
Действие	0,119	0,15	0,202	0,938	1,17	1,593

В таблице индексы min и max параметров распределения (1) дают минимальное и максимальное возможное значение соответствующего параметра.

Для подтверждения обоснованности выбора распределения Вейбулла в качестве закона, описывающего случайные времена между происшествиями на АС, в третьей главе выполнено сравнение на согласованность данных опыта эксплуатации с теоретическим распределением. В качестве теоретического распределения рассматривались распределение Вейбулла и гамма-распределение, для которых значения оценок параметров получены на основании опыта эксплуатации АС России обобщенным методом моментов. Проверка этих двух распределений на согласованность с данными опыта эксплуатации по критерию  $\chi^2$ -Пирсона показала, что распределение Вейбулла лучше согласуется с данными наблюдений, чем гамма-распределение. Из этого следует, что для описания случайных потоков происшествий на АС более оправдано использование распределения Вейбулла.

В заключительных разделах главы приводятся примеры использования полученных в ней результатов в исследованиях безопасности АС. Так, рассмотрен пример использования оценок показателей надежности персонала, полученных из опыта эксплуатации отечественных АС, при выполнении вероятностного анализа безопасности (ВАБ) реакторной установки ВВЭР-1000 (В-320).

В примере приводится упрощенное описание действий персонала, выполняемых при опробовании насосов первого канала системы безопасности, составлено на основе оперативного бланка. Во время испытаний оборудования системы безопасности персонал: выполняет проверку закрытого положения арматуры системы; разбирает электросхемы арматуры; собирает электросхемы арматуры с занесенным результатов тех. обслуживания и проверки защит и блокировок в журналы.

Поскольку речь идет о стояночных режимах, рассмотрена возможность происшествия во время ППР (строка 2, таблица 3). Учтено, что ошибка персонала сопровождается происшествием (строка 6 таблица 2). Ошибка может произойти на этапе проверки закрытого положения арматуры – ошибка считывания информации (строка 7 таблица 3), и на остальных этапах – две ошибки действия

(строка 10 таблица 3), и когда принимается решение, и производятся записи о результатах испытаний – ошибка принятия решения (строка 9 таблица 3).

Вероятность неработоспособного состояния системы безопасности из-за ошибок персонала при обесточивании задвижек на интервале времени 1 месяц есть произведение условных вероятностей того: что происшествие произойдет во время ППР; что оно будет сопровождаться ошибкой персонала; что произойдет хотя бы одна из указанных ранее ошибок. Оценка вероятности отказа при опробовании насосов первого канала системы безопасности из-за ошибок персонала, полученная при использовании результатов представленной работы, составляет  $4,23 \cdot 10^{-3}$ .

Условная вероятность реализации происшествия во время ППР и вероятность, что происшествие будет сопровождаться ошибкой персонала, определена как отношение интенсивности отказов, распределения Вейбулла рассматриваемого события  $h(t) = \rho \cdot \alpha \cdot (\rho \cdot t)^{\alpha-1}$ , к интенсивности происшествий всех типов из таблицы 2. Вероятность ошибки заданного типа определена соотношением  $1 - \exp\{-(\rho_7 \cdot t)^{\alpha_7} - 2 \cdot (\rho_{10} \cdot t)^{\alpha_{10}} - (\rho_9 \cdot t)^{\alpha_9}\}$ , где индексы параметров соответствуют данным из таблицы 3.

Другой пример использования полученных отраслевых оценок надежности персонала в исследованиях безопасности РУ, представлен для расчета вероятности отказа на требование системы подпитки бака исследовательского реактора ВВР-ц. В соответствии с инструкцией по эксплуатации РУ, при достижении уставки срабатывания предупредительной защиты по уровню в баке реактора, оператор должен открыть первую задвижку, если снижение уровня в баке реактора продолжается, то необходимо дополнительно открыть еще одну задвижку канала системы безопасности. В крайнем случае, когда подпитки через две задвижки недостаточно, чтобы остановить снижение уровня, оператор должен открыть задвижку на дублирующей нитке подпитки. Вероятность не выполнения своих функций оператором при поступлении требования на срабатывание, в данном примере это последовательное открытие арматуры системы безопас-

ности, можно оценить в предположении, что на интервале времени между опробованиями происходит поступление требования на выполнение персоналом своих функций (с вероятностью 1). Тогда, вероятность ошибки персонала при поступлении требования будет определяться законом надежности персонала.

Одним из результатов настоящей работы являются показатели надежности персонала РУ для ошибок, которые проявляются после реализации исходного события и только ухудшают сценарий развития происшествия. Поскольку при оценке вероятности отказа на требование системы подпитки бака реактора, предполагается, что требование на работу системы поступило, то рассматривать необходимо ошибки персонала, которые проявляются после начала исходного события. В соответствии с этим, параметры распределения Вейбулла для ошибки персонала сопровождающей исходное событие равны  $\alpha = 0,722$  и  $\rho = 0,78 \cdot 10^{-3}$  1/реактор·сутки. Оценка вероятности ошибки персонала реактора ВВРц на интервале времени 5 суток (время работы на мощности) при поступлении требования на оперативное управление системой подпитки бака реактора выполнена с помощью соотношения  $1 - \exp\{-(\rho \cdot t)^\alpha\}$  и составляет  $35 \cdot 10^{-3}$ .

Кроме указанных, разработан пример использования данных отраслевого опыта эксплуатации для поддержки принятия управленческих решений на конкретной выбранной АС. Суть идеи заключается в сравнении показателей надежности конкретной АС со средними по отрасли, полученными, в частности, в данной работе. На основании такого сравнения можно ориентировочно судить о состоянии технического парка и об общем уровне подготовки персонала рассматриваемой площадки. В качестве закона, описывающего надежность АС, использовано распределение Вейбулла, параметры которого и сравниваются с отраслевыми значениями полученными в работе.

Сравнение величин параметров распределения Вейбулла, характеризующих надежность атомной станции, основано на эвристическом суждении: чем больше величина параметра  $\rho$  распределения (1) тем «хуже» надежность объекта исследования, в отношении  $\alpha$  можно сказать, что лучше бы его величина бы-

ла в интервале от 0 до 1, тогда отказы связаны с «приработкой». Причем, чем ближе  $\alpha < 1$  к единице, тем лучше надежность изделия, т.к. в этом случае отказы из приработочных переходят в разряд внезапных. Если же  $\alpha > 1$ , то отказы вызваны старением и деградацией оборудования, систем человек-машина и других комплексов составляющих объект исследования.

Для демонстрации возможности использования отраслевых сведений о надежности, полученных в данной работе, при принятии управленческих решений выполнен анализ опыта эксплуатации Балаковской АЭС. Сформирована выборка, состоящая из 26 происшествий за промежуток времени с 1996 по 2007 г. В качестве причин реализации происшествий рассмотрены: отказы оборудования и отказы (ошибки) персонала. Интервалы времени между происшествиями рассчитаны с учетом одновременной эксплуатации 4-х энергоблоков.

Расчет оценок параметров  $\alpha$  и  $\rho$  распределения Вейбулла для происшествий на Балаковской АЭС выполнен методом, основанным на принципе метода моментов (7). Результаты расчетов представлены в таблице 4. Сравнение оценок, полученных для Балаковской АЭС (таблица 4), с соответствующими оценками параметров по отрасли (таблица 2) дает возможность судить о состоянии оборудования и персонала этой АС, относительно отрасли в целом.

Таблица 4

Результаты расчетов оценок параметров распределения Вейбулла по происшествиям на Балаковской АЭС

№ п/п	Тип происшествия	Число событий (k)	Параметры распределения Вейбулла					
			$\rho_{\min} \cdot 10^3$ 1/(р·с)	$\rho \cdot 10^3$ 1/(р·с)	$\rho_{\max} \cdot 10^3$ 1/(р·с)	$\alpha_{\min}$	$\alpha$	$\alpha_{\max}$
1	Все	26	1,31	2,2	4,53	0,52	0,66	0,96
2	Из-за технических отказов	21	0,95	1,6	2,9	0,58	0,75	1,13
3	Из-за ошибок персонала	5	0,22	0,46	1,4	0,51	0,76	2,5

Так, из сравнения отраслевых показателей с результатами, полученными для Балаковской АЭС, следует, что отраслевое значение фактора формы рас-

пределения Вейбулла отличается от соответствующего параметра Балаковской АЭС для происшествий, причинами которых были как ошибки персонала, так и отказы оборудования ( $\alpha_{\text{Бал}}=0,66 > \alpha_{\text{рф}}=0,552$ ). Кроме этого, среднее значение оценки  $\alpha_{\text{Бал}}$  больше, правой границы интервала значений  $\alpha_{\text{рф}}$ . Сравнение оценок параметра  $\rho$  показывает, что по этому параметру Балаковская АЭС также более благополучна, чем отрасль в целом. Это говорит о том, что вероятность неплавно-вых остановов Балаковской АЭС ниже, чем средняя по Российским АС.

Выделить доминирующие причины происшествий на Балаковской АЭС, можно с помощью сравнительного анализа оценок параметров распределения Вейбулла. Сравнение фактора формы распределения Вейбулла для происшествий реализовавшихся из-за ошибок персонала на рассматриваемой площадке с данными таблицы 2 показало, что его величина больше чем отраслевое значение ( $\alpha_{\text{Бал}}=0,76 > \alpha_{\text{рф}}=0,709$ ), и лежит внутри интервала значений  $\alpha_{\text{рф}}[0,603; 0,881]$ . Кроме того, оценки среднего значения параметра  $\rho$  меньше, чем в среднем по отрасли. Это свидетельствует о более высокой в среднем надежности персонала в сравнении с отраслью.

Аналогично выполнено соотнесение происшествий из-за технических отказов оборудования. В результате получено, что технический парк рассматриваемой атомной станции находится в более благополучном состоянии, чем в целом по отрасли.

Приведенный пример анализа может быть использован для получения вспомогательной информации, позволяющей сформировать адекватную картину текущего состояния, как единичных энергоблоков, так и их комплексов, объединенных по разным критериям (например: расположение на одной площадке, тип реактора и т.д.). Предложенная методика может помочь при принятии технических и организационных решений по управлению надежностью и безопасностью ядерных энергоблоков, опираясь на использованные здесь количественные критерии надежности оборудования и персонала.

Балаковская АЭС, выбранная в качестве примера, оказалась более благополучной по предложенным показателям, в сравнении со средними показате-

лями по отрасли. Следовательно, есть АС, у которых эти же показатели хуже, чем средние по отрасли. Аналогичный анализ, как для Балаковской АЭС, выполнен для большинства отечественных АС, численные результаты которого приводятся в диссертации и не приводятся здесь из-за громоздкости. Сравнительный анализ результатов оценки параметров распределения (1) каждой отечественной АЭС с отраслевыми значениями показал, что для Смоленской АЭС, Курской АЭС и Кольской АЭС параметр  $\alpha$  значительно больше единицы для отказов персонала. Кроме этого сравнение параметра  $\alpha$  для потока происшествий из-за ошибок персонала с тем же параметром только для происшествий из-за отказов оборудования показал, что доминирующими причинами происшествий на отмеченных выше АС являются ошибки/отказы персонала. Соответственно, целесообразно принимать управленческие решения, позволяющие прежде всего повысить уровень подготовки и ответственности персонала на указанных площадках. В этом ракурсе, управленческие решения, главной целью которых является обновление и модернизация технического парка на указанных АС имеют меньшую ценность в смысле обеспечения приемлемого уровня надежности и безопасности АС.

### **Основные выводы**

1. Разработаны модель генетического алгоритма и альтернативный метод, основанный на принципе метода моментов, для расчета оценок параметров распределения случайного времени между происшествиями по данным опыта эксплуатации РУ, что позволяет не только получать оценки значений параметров потоков происшествий, необходимых для выполнения исследований безопасности РУ, но и сравнивать значения оценок, полученных двумя принципиально разными методами.

2. На основании опыта эксплуатации отечественных энергоблоков получены оценки параметров распределения Вейбулла для потоков происшествий на российских РУ с помощью модели генетического алгоритма и с помощью обобщенного метода моментов. Результаты, полученные двумя разными мето-

дами, совпадают в пределах погрешности, что подтверждает их достоверность. Полученные данные, в том числе, могут использоваться для оценок иницирующих ошибок персонала.

3. По данным опыта эксплуатации российских РУ выполнены оценки значений параметров гамма-распределения обобщенным методом моментов. Сравнение результатов расчетов параметров для гамма-распределения и распределения Вейбулла подтвердило, что описание случайных времен между происшествиями на РУ распределением Вейбулла наиболее оправдано.

4. Разработаны примеры использования полученных результатов в исследованиях безопасности российских РУ. В одном из примеров представлен расчет вероятности отказа на требование системы подпитки бака реактора ВВР-ц, которая в авариях с потерей теплоносителя обеспечивает расхолаживание РУ. В другом примере выполнена оценка вероятности до-аварийной ошибки персонала, связанной с опробованием насосов системы безопасности реакторной установки ВВЭР-1000 (проект В-320). Представленные примеры демонстрируют возможность использования полученных в данной работе результатов в исследованиях безопасности. Представлен пример использования полученных результатов при принятии управленческих решений с учетом фактического состояния надежности человеко-машинных комплексов РУ, что позволяет целенаправленно влиять на надежность и безопасность РУ.

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

1. Волков Ю.В. Разработка методов и оценка показателей надежности персонала по статистике инцидентов на АЭС РФ / Ю.В. Волков, Д.С. Самохин, А.В. Соболев, А.Н. Шкаровский // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. — №4. — С. 15-24.

2. Волков Ю.В. Разработка методов и оценка показателей надежности персонала при действиях в переходных и аварийных режимах / Ю.В. Волков, Д.С. Самохин, А.В. Соболев // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: сборник докл. IV Международной научно-технической конференции, Москва, 21-23 мая 2008 г. — Москва: Концерн «Росэнергоатом», 2008. — С. 103-110.

3. Волков Ю.В. Анализ состояния современных методов оценки надежности персонала в ядерных технологиях / Ю.В. Волков, А.В. Соболев // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – № 3. – С. 13-19.

4. Волков Ю.В. Соболев А.В. Методы и алгоритмы обработки статистических данных по отказам на АЭС // Актуальные проблемы физики ядерных реакторов – эффективность, безопасность, нераспространение: материалы XV семинара по проблемам физики реакторов (Волга-08). Москва, 2 – 6 сентября 2008 г. – М.: МИФИ, 2008. – С. 217

5. Волков Ю.В. Метод учета надежности человеко-машинных комплексов РУ при принятии управленческих решений и результаты его применения на примере Балаковской АЭС / Ю.В. Волков, А.В. Соболев // Известия Вузов. Ядерная энергетика – 2013. – № 3 – С. 42-47.

6. Волков Ю.В. Соболев А.В., Самохин Д.С. Первый опыт статистического анализа инцидентов на АС РФ// Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010: Сб. научных трудов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – т.1. – С. 215.

7. Волков Ю.В. Соболев А.В. Применение отраслевых данных о надежности человеко-машинных комплексов реакторных установок при принятии управленческих решений, и результаты его применения на примере Балаковской АЭС // Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых – Тепловые и ядерные энерготехнологии «Энергия-2016»: Материалы конференции. В 6 т. Т. 2 – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2016. – С. 18-20.

Компьютерная верстка А.В. Соболев

---

ЛР N 020713 от 27.04.1998

Подписано к печати 29.09.16

Формат бумаги 60×84/16

Печать ризограф

Бумага SvetoCopy

Печ. л. 1,5

Заказ № 339

Тираж 60 экз.

Цена договорная

---

Отдел множительной техники ИАТЭ  
249040, г.Обнинск, Студгородок, 1.