

На правах рукописи



**Плешакова Надежда Владимировна**

**МЕТОДЫ ЭРГОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И  
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ  
ПРОЦЕДУР ДЛЯ ОПЕРАТОРОВ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ**

Специальность

19.00.03 - Психология труда, инженерная психология, эргономика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Обнинск  
Санкт-Петербург  
2014

Работа выполнена в Обнинском институте атомной энергетики – филиале федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» на кафедре автоматизированных систем управления и в федеральном автономном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) на кафедре биотехнических систем.

Научный руководитель

Доктор технических наук, профессор Анохин Алексей Никитич

Официальные оппоненты:

Львов Владимир Маркович, доктор технических наук, доктор психологических наук, профессор, Генеральный директор ННУ «Научный центр «Институт эргономики и социально-экономических технологий»

Гончарова Татьяна Александровна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник – руководитель группы эргономики ОАО «Концерн «НПО Аврора»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «МАТИ – Российский государственный технологический университет имени К.Э.Циолковского».

Защита состоится «18» декабря 2014 г. в 14 часов 00 минут на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.09 в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте [www.eltech.ru](http://www.eltech.ru).

Автореферат диссертации разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.238.09

кандидат технических наук, доцент



Е.В.Садыкова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** АЭС представляет собой систему «человек-машина» (СЧМ), функционирование которой сопряжено с опасностью для человека и окружающей среды. Централизованное управление энергоблоком АЭС осуществляется оперативным персоналом с блочного пункта управления (БПУ). Вся деятельность операторов регламентируется множеством разнородных эксплуатационных процедур, начиная от инструкций по эксплуатации технологического оборудования и заканчивая планами действий в чрезвычайных ситуациях. Суммарный объем процедур современного БПУ может достигать нескольких тысяч страниц текста. По статистике процедуры, в том числе их несовершенство, служат причинами от 15 до 30 % ошибочных действий оператора. Таким образом, качество процедур способно оказывать существенное влияние на надежность и эффективность деятельности операторов БПУ.

Существует множество работ, посвященных исследованию и проектированию СЧМ в целом и эксплуатационных процедур в частности. Оценке эффективности и надежности работы операторов, процессу принятия решений и совершению ошибок посвящены исследования А.И. Губинского, В.Д. Небылицина, Г.С. Никифорова, А.Т. Ашерова, А.И. Нафтульева, В.Г. Евграфова, С.А. Чачко. Различным аспектам группового взаимодействия и решения оперативных задач уделено внимание в работах Б.Ф. Ломова, В.Ф. Венды, Н.Н. Обозова и др. Труды отечественных и зарубежных ученых, среди которых Дж.М. О'Хара (J.M. O'Hara), Дж. Хиггинс (J.C. Higgins), У.С. Браун (W.S. Brown), У. Стаблер (W. Stubler), внесших вклад в исследование вопросов компьютеризации процедур и анализа их влияния на ошибки операторов, легли в основу руководств, справочников и стандартов (ГОСТ, МЭК, IEEE, NUREG), регламентирующих проектирование БПУ АЭС и его компонентов, включая процедуры и программы подготовки операторов.

В ядерной энергетике процедурам и анализу их влияния на деятельность операторов посвящено ограниченное число фрагментарных узконаправленных исследований. В работах У. Роуз (W. Rouse) и С. Роуз (S. Rouse) предприняты попытки классификации ошибок, связанных с использованием процедур. Имеются модели проверки адекватности алгоритмов (У. Жанг (W. Zhang), У. Квин (W. Qin)), стандарты и технические отчеты по верификации и валидации процедур (NUREG, TECDOC). В то же время остаются нерешенными вопросы о влиянии на деятельность операторов заложенных в процедурах подходов к управлению авариями, о влиянии процедур на эффективность групповой деятельности операторов, о специфических ошибках операторов, обуслов-

ленных недостатками процедур. Исследованию перечисленных вопросов посвящена настоящая работа.

**Объектом исследования** являются эксплуатационные процедуры потенциально опасных объектов, в частности, атомных электростанций.

**Предметом исследования** является анализ влияния характеристик эксплуатационных процедур на деятельность оперативного персонала БПУ АЭС при действиях в условиях нештатных ситуаций.

**Цели и задачи диссертации.** Целью работы является улучшение деятельности оперативного персонала БПУ АЭС за счет выработки решений и рекомендаций, направленных на повышение качества и эффективности применения процедур операторами в условиях нештатной ситуации. Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Классификация эксплуатационных процедур.
2. Выявление, систематизация и анализ значимости влияния характеристик процедур на надежность и эффективность деятельности персонала БПУ.
3. Анализ влияния процедур на качество групповой деятельности операторов в нештатной ситуации.
4. Анализ влияния заложенного в процедуру подхода к управлению авариями на эффективность работы операторов.
5. Выявление и систематизация специфических ошибок операторов БПУ, обусловленных недостатками процедур.
6. Разработка методических основ компьютеризации процедур (метод представления знаний, архитектура системы, требования и пр.).

**Методы исследования.** В работе использованы методы эргономики и инженерной психологии, теории систем и системного анализа, структурного моделирования, теории вероятностей и математической статистики, теории искусственного интеллекта

**Научная новизна:**

1. Сформирован перечень характеристик процедур и определена значимость этих характеристик для обеспечения безошибочной работы операторов. Сформированный перечень систематизирует и существенно расширяет известную номенклатуру характеристик, упоминаемых в литературных источниках.

2. Разработана методика анализа речевой коммуникации оперативного персонала БПУ, основанная на структурной декомпозиции актов передачи информации и применении аппарата случайных процессов для количественной оценки наложения шума на коммуникацию. В отличие от существующих методов акустических измерений и методов семантического анализа коммуникации, предложенная методика позволяет выполнить количественную оценку объема и характера коммуникации, а также прогнозировать возможные ошибки коммуникации, возникающие вследствие наложения шума.

3. Выделены и классифицированы ошибки операторов, обусловленные недостатками эксплуатационных процедур. Предложенная классификация дополняет известные классификации ошибок оператора в части учета ошибок использования процедур.

4. Разработан метод представления знаний, основанный на двухуровневых семантических сетях и диагностических шаблонах и позволяющий формировать базу знаний на основе информации, извлекаемой из текста эксплуатационных процедур.

#### **Основные научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Перечень характеристик процедур и их значимость для обеспечения безошибочной работы операторов.

2. Методика анализа речевой коммуникации операторов, возникающей при использовании процедур.

3. Классификация ошибок операторов, обусловленных недостатками процедур.

4. Метод представления знаний, извлекаемых из эксплуатационных процедур.

#### **Достоверность научных положений**

Структура характеристик процедур обоснована результатами экспертного оценивания. Достоверность методики анализа речевой коммуникации, перечень и структуры актов передачи информации и наличие факторов, влияющих на коммуникацию, обеспечивается применимостью на практике и согласованностью с результатами собственных экспериментальных исследований деятельности операторов и работами других авторов. Классификация специфических ошибок, обусловленных недостатками процедур, согласуется с известными классификациями ошибок человека-оператора (А.И. Губинский, В.Ф. Венда), подтверждена результатами интервью, проведенными с операторами БПУ и инструкторами ПМТ, и результатами экспериментальных исследований. Применение широко известного метода семантических сетей, а также опыт внедрения и практическая применимость обуславливают достоверность предложенного метода представления знаний процедур.

#### **Практическая ценность результатов и область применения**

1. Предложенная методика анализа речевой коммуникации позволяет вырабатывать обоснованные рекомендации по улучшению речевой коммуникации, обеспечивающей взаимодействие операторов при ликвидации нештатных ситуаций.

2. Сформированный перечень характеристик процедур и разработанная на его основе методика эргономической оценки процедур позволяют анализировать документы, регламентирующие деятельность персонала в нештатных ситуациях, и апробированы для анализа «Инструкций по ликвидации аварий» Балаковской АЭС.

3. Метод представления знаний явился основой прототипа системы компьютеризованных процедур ComProMIS (грант Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «У.М.Н.И.К.», свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2014616899 от 08.07.2014), обеспечивающей поддержку деятельности оператора в нештатных ситуациях путем контекстного пошагового представления релевантной процедуры.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на 16 конференциях, в том числе на X, XI, XII, XIII Международных конференциях «Безопасность АЭС и подготовка кадров» (Обнинск, 2007, 2009, 2011, 2013), III международной научно-практической конференции «Современные тренажерно-обучающие комплексы и системы» (Киев, 2007), 16 Всемирном конгрессе по эргономике IEA'2006 (Маастрихт, 2006), Ежегодной конференции эргономического общества Великобритании (Лондон, 2009), Научных сессиях НИЯУ МИФИ (Москва, 2011, 2013), IV, VIII Международных конференциях «Психология и эргономика: единство теории и практики» (Тверь, 2005, 2013).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 40 печатных работ, в том числе 4 статьи в реферируемых журналах из перечня ВАК и 35 работ в сборниках трудов научных конференций. Получено свидетельство о регистрации одной программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Работа изложена на 147 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии из 155 источников, двух приложений, иллюстрирована 33 рисунками и 13 таблицами.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность проблемы, определяется предмет и объект исследования, приводятся цели и задачи диссертации, методы исследования, научные положения, выносимые на защиту, апробация и достоверность работы, структура и объем диссертации.

В **первой главе** приведена классификация эксплуатационных процедур, применяемых операторами БПУ для управления энергоблоком АЭС. Процедуры разделены в соответствии с:

подходом к управлению – на событийно-ориентированные, симптомно-ориентированные и функционально-ориентированные;

классом состояний энергоблока АЭС – на инструкции по эксплуатации систем и оборудования, процедуры реакции на сигнализацию, инструкции действий при нарушениях нормальной эксплуатации, инструкции по ликвидации проектных аварий, инструкции по управлению запроек-

ными авариями, инструкции по управлению тяжелыми авариями, планы действий в чрезвычайных ситуациях, карточки пожаротушения и др.;

физическим носителем – на компьютеризованные и бумажные;

форматом представления – на процедуры в текстовом, графическом и табличном форматах.

Рассмотрены различные аспекты применения процедур операторами, включая последовательность работы с процедурами, вход в процедуру и исполнение ее алгоритма, коммуникацию, возникающую в процессе работы с процедурами. Описывается проблема влияния качества эксплуатационных процедур на эффективность работы оперативного персонала, в том числе на возникновение ошибок человека-оператора. Рассмотрены возможные методы анализа характеристик процедур. Выполнена постановка задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке перечня характеристик эксплуатационных процедур, влияющих на деятельность операторов БПУ АЭС. Выявлены 23 характеристики, которые объединены в четыре категории: характеристики алгоритма, эргономические характеристики, характеристики входа в процедуру и выхода из нее, характеристики сложности (рисунок 1).

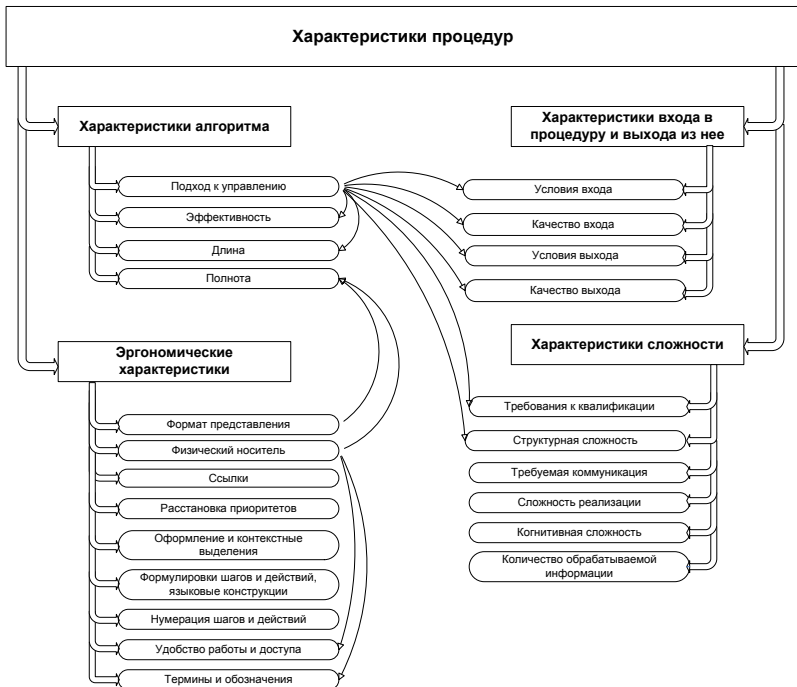


Рисунок 1 – Структура характеристик эксплуатационных процедур

Для анализа полноты данной структуры и оценки влияния каждой характеристики на надежность операторов БПУ АЭС был проведен экспертный опрос (эксперты – 13 специалистов в области эргономики, психофизиологического обеспечения и подготовки операторов АЭС). Эксперты оценивали по пятибалльной шкале степень потенциального влияния каждой характеристики на совершение оператором ошибки  $\lambda \in [0; 4]$ , а также уточняли, ошибки какого типа она может вызывать.

В ходе опроса эксперты не высказали мнение о неполноте структуры выделенных характеристик процедур. Полученные в результате экспертного опроса баллы были преобразованы в слабые ранги, на основании которых вычислялись коэффициенты парной ранговой корреляции Спирмена и коэффициент конкордации ( $W = 0,27$ ). Для оценки надежности результатов экспертизы был выбран критерий согласия «хи-квадрат»  $\chi^2$ . Полученное значение  $\chi^2_{\text{набл}} = 77,2$  больше табличного значения  $\chi^2_{\text{кр}} = 33,9$ , взятого при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы  $r = n - 1 = 22$ . Таким образом, коэффициент конкордации был признан значимым, а группа экспертов – репрезентативной.

Для каждой из характеристик было посчитано среднее значение  $\lambda_{\text{ср}}$  и дисперсия  $D$ . Обработка полученных значений показала, что наиболее высокой значимостью при дисперсии оценок  $D \in (0,51; 0,76)$  обладают «Качество входа» ( $\lambda_{\text{ср}} = 3$ ), «Структурная сложность» ( $\lambda_{\text{ср}} = 3$ ), «Условия входа» ( $\lambda_{\text{ср}} = 3,15$ ), «Условия выхода» ( $\lambda_{\text{ср}} = 3,31$ ), «Эффективность» ( $\lambda_{\text{ср}} = 3,38$ ), «Когнитивная сложность» ( $\lambda_{\text{ср}} = 3,46$ ).

Наибольшее расхождение мнений ( $D \geq 1$ ) эксперты показали в отношении характеристик «Подход к управлению», «Ссылки», «Количество обрабатываемой информации», «Расстановка приоритетов», «Термины и обозначения», «Нумерация шагов и действий», «Требования к квалификации».

При рассмотрении категорий характеристик эксперты отметили категорию «Эргономические характеристики» как наименее влияющую на совершение ошибок операторов ( $\lambda_{\text{ср}} = 2,16$ ).

В результате была предложена методика эргономической оценки процедур, описание которой приведено в **Приложении А**. Методика создавалась и апробировалась для анализа инструкций по ликвидации аварий Балаковской АЭС.

В ходе разработки и применения методики был выявлен методический «провал» и недостаток знаний о влиянии двух характеристик процедур на деятельность операторов, а именно:

1. Требуемая коммуникация. Работа персонала БПУ АЭС носит групповой характер. Взаимодействие операторов происходит на фоне общего информационного поля, которое создается приборными панелями, экранами коллективного пользования и дополняется переговорами,



сообщениями и командами. Большинство процедур и регламентов их применения предусматривают активную речевую коммуникацию, которая происходит на фоне шума от звуковой сигнализации, наложения нескольких переговоров и в условиях дефицита времени. Значимость этой характеристики оценена выше средней ( $\lambda_{\text{ср}} = 2,46$  при  $D = 0,86$ ), а потому ее исследование представляется чрезвычайно важным.

2. Подход к управлению. Данная характеристика также была оценена довольно высоко ( $\lambda_{\text{ср}} = 2,54$ ) при некотором расхождении мнений экспертов ( $D = 1$ ). Это вполне согласуется с общим отношением к нему со стороны специалистов по ядерной энергетике. На сегодняшний день существует большое количество как сторонников, так и противников симптомно-ориентированного подхода к управлению энергоблоком, являющегося альтернативным по отношению к традиционному событийно-ориентированному. В связи с отсутствием объективных данных о влиянии этих подходов на качество деятельности операторов, их исследование представляется чрезвычайно актуальным.

В **третьей главе** анализируется влияние выделенных характеристик процедур на деятельность оперативного персонала БПУ АЭС.

Проведен анализ речевой коммуникации операторов как основы их группового взаимодействия. Для этого были структурированы и систематизированы акты коммуникации операторов, проанализировано их количество и время, затрачиваемое операторами на озвучивание шагов процедуры, выдачу команд, обратную связь и прочие коммуникативные действия, а также ошибки, сопряженные с речевой коммуникацией.

В качестве простейшего элемента коммуникации выступает *акт передачи информации* от отправителя к одному или нескольким получателям (рисунок 2).

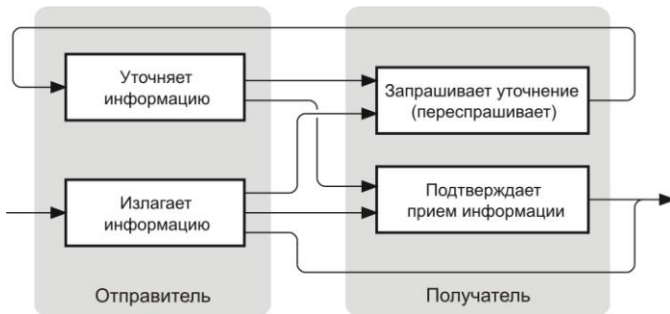


Рисунок 2 – Схема акта передачи информации от отправителя к получателю

В зависимости от цели и содержания передаваемой информации, было выделено три разновидности актов передачи информации: запрос,

сообщение, команда. Комбинации перечисленных актов передачи информации образуют шесть видов актов коммуникации (рисунок 3).

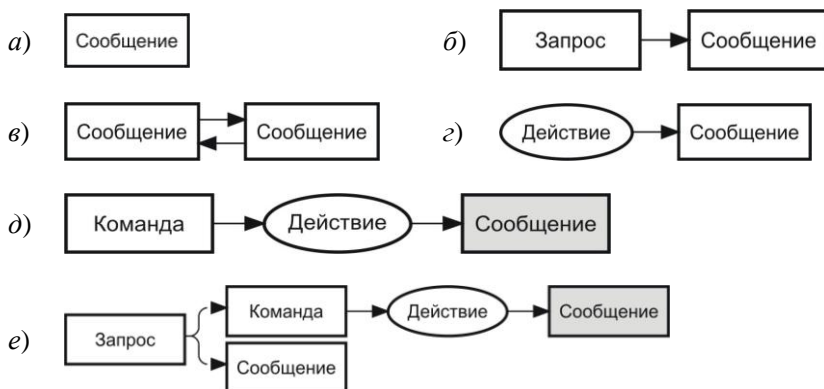


Рисунок 3 – Структурные диаграммы актов коммуникации: *а* – информационное сообщение, *б* – запрос-ответ, *в* – обсуждение, *г* – доклад о действии, выполненном без команды, *д* – команда-действие, *е* – запрос на выполнение действия (серым выделены необязательные элементы)

Анализ речевой коммуникации (по видеозаписи тренировок на полномасштабном тренажере Балаковской АЭС) включал в себя:  
оценку относительной доли различных типов актов коммуникации;  
выявление факторов, влияющих на коммуникацию;  
выработку мер по улучшению коммуникации.

Для анализа была отобрана ситуация с наложением двух исходных событий, которая является довольно сложной и характеризуется большими объемами информации и действий, а также дефицитом времени. В эксперименте участвовали четыре смены операторов БПУ, состоящие из четырех человек – начальника смены блока (НСБ), координирующего работу смены, и инженеров управления реактором, оборудованием реакторного цеха и турбиной.

Всего за четыре прогона сценария было зафиксировано 529 актов коммуникации (примерно 160–180 в каждом прогоне). Все они были классифицированы и измерены (таблица 1). Коммуникация заняла примерно половину всего времени решения оперативной задачи. Средняя длительность одного акта коммуникации составила 7,7 сек. Большую долю коммуникативных действий составили информационные сообщения (38%), запросы-ответы (23,5%) и команды-действия (24%).

В ходе анализа были выявлены факторы, отрицательно (факторы 1, 2) и положительно (факторы 3, 4) влияющие на коммуникацию:

1) высокий уровень шума на БПУ;

- 2) сложное информационное содержание актов;
- 3) использование профессионального сленга;
- 4) привлечение внимания друг друга к сообщениям.

Таблица 1 – Характеристики коммуникации

Характеристика	Прогон			
	1	2	3	4
Длительность прогона, мин	44	32	26	35
Время, затраченное на коммуникацию, мин	19,4	15,7	15,8	17,0
Доля времени прогона, затраченная на коммуникацию, %	44,2	49,1	60,6	48,5
Полнота озвучивания формулировок шагов процедуры, %	17	37	37,7	25,4
Прогнозируемое время коммуникации, если бы шаги озвучивались полностью, мин	22,3	17,2	17,1	20,6
Общее время звучания сигнализации, мин	4	4,6	6	5
Доля коммуникации на фоне звуковой сигнализации, %	4,8	8,7	14,9	7,5
Доля коммуникации на фоне сигнализации и переговоров, %	10	11,1	17,8	10,3

Для количественной оценки объема коммуникации, происшедшей на фоне шума (работающей сигнализации и других переговоров), последовательность актов коммуникации и звуковой сигнализации была представлена как два различных дискретных потока  $C^*$  и  $A^*$ , каждый из которых состоит из пауз длительностью  $\xi_i$  и периодов активности коммуникации или сигнализации длительностью  $\eta_i$ . Поскольку за время прогона производится несколько десятков ( $N \approx 60 - 110$ ) срабатываний сигнализации и разговоров с операторами «по месту», при этом на озвучивание сработавших сигнализаций и доклад о результатах переговоров во время прогона затрачивается в общей сложности  $\sim 20 - 30$  секунд, что составляет  $\sim 2 - 3,5\%$  от всего объема коммуникации смены, то можно считать, что дискретные потоки  $C^*$  и  $A^*$ , независимы. Однако даже в этом случае для чистоты получаемых оценок эта «зависимая» коммуникация отбрасывается и не учитывается при получении оценки.

Вероятность наложения шума на коммуникацию вычисляется с использованием ядерных оценок плотностей распределения длительности пауз  $f_{\xi}(t)$  и длительности периодов активации  $f_{\eta}(t)$ , а также посред-

ством решения полученного уравнения Вольтерра 2-го рода методом конечных сумм таким образом, что

$$P(t \in A^* ; t \in C^*) = P(t \in A^*) \cdot P(t \in C^*) = \varphi_1 \cdot \varphi_2 ,$$

где  $\varphi(t) = P(t) + \int_0^t \varphi(t - \tau) f_{\xi+\eta}(\tau) d\tau$  – вычисляемые для потоков ком-

муникации и сигнализации  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , соответственно;  $f_{\xi+\eta}(t)$  – плотность распределения суммы величин  $\xi+\eta$ ;  $t=i \cdot h$ ;  $i=1,2,3 \dots$ ;  $h$  – шаг ( $h=0,1$  сек).

Результаты численных расчетов наложения шума на БПУ на коммуникацию операторов показали, что примерно от 5 до 15 % коммуникации персонала БПУ происходит на фоне звуковой сигнализации, и от 10 до 18 % – на фоне звуковой сигнализации и разговоров с операторами по месту.

Сформулирован ряд рекомендаций, способствующих улучшению коммуникации:

1) «развести» характеристики акустической сигнализации БПУ с характеристиками человеческого голоса (тональность, частота и др.);

2) сделать формулировки шагов процедур более легкими и понятными, исключив сложные языковые конструкции;

3) унифицировать, исключить двусмысленность и регламентировать использование устоявшегося профессионального сленга для обозначения определенных действий и технологического оборудования;

4) обеспечить НСБ контекстной технологической информацией, состав которой зависит от сложившихся условий и применяемой процедуры, что может существенно уменьшить общий объем коммуникации за счет снижения количества актов «запрос-ответ»;

5) концентрировать внимание получателя на сообщениях с высоким приоритетом (например, с помощью использования слова «важно»), что позволит избежать потери важной информации в случае наложения актов коммуникации;

6) вырабатывать у операторов навыки обеспечения обратной связи по передаваемым и принимаемым сообщениям.

Проведен анализ влияния заложенного в процедуре подхода к управлению аварией на эффективность деятельности операторов. Исследованы событийный и симптомно-ориентированный подходы. При событийно-ориентированном управлении операторы должны сначала идентифицировать происшедшее событие, а затем исполнить релевантную процедуру. Этот подход «не работает» в случае наложения нескольких событий или появления неучтенного события. Симптомно-ориентированный подход не требует идентификации события, управление строится только исходя из текущих наблюдаемых симптомов.

Для экспериментальной оценки влияния этих подходов на эффективность деятельности оператора на ПМТ Балаковской АЭС прогонялся сценарий, моделирующий наложение двух исходных событий:

- 1) течи в парогенераторе из первого контура во второй;
- 2) течи из первого контура в гермооболочку реактора.

В эксперименте участвовали четыре смены операторов БПУ. Две смены работали по симптомным, две – по событийным процедурам. При использовании событийного подхода операторам предстояло выбрать релевантную процедуру из 25 возможных. При использовании симптомно-ориентированного подхода сначала выполняется «диагностическая» процедура, которая затем отсылает операторов к другим процедурам комплекта. Результаты эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики работы операторов в нештатной ситуации

Подход к управлению	Симптомный		Событийный	
	1	2	3	4
Номер смены операторов	1	2	3	4
Время идентификации первого события, с	65	74	84	83
Время идентификации второго события, с	129	223	424	115
Время стабилизации состояния энергоблока, мин	32	35	44	26
Количество внутренних / внешних переходов при использовании процедуры	9/4	11/3	0/4	0/2

Эти данные и данные качественного анализа позволяют сделать следующие выводы:

идентификация второго события осуществляется на фоне действий по ликвидации первого события и потому занимает намного больше времени;

несмотря на совпадение начальных точек входа, траектории переходов между процедурами у разных смен различались, что явилось следствием сложности моделируемой ситуации и ошибок операторов;

в сложных ситуациях с наложением событий симптомно-ориентированные процедуры дают более предсказуемое время стабилизации состояния энергоблока;

действия как по симптомным, так и по событийным процедурам позволяют достаточно плавно приводить энергоблок в стабильное безопасное состояние; большее значение имеет отсутствие грубых ошибок операторов;

разветвленная сеть внутренних и внешних переходов делает алгоритм симптомно-ориентированных процедур громоздким, не всегда оптимальным и может стать источником ошибок.

Выполнен анализ ошибок операторов, связанных с применением процедур. На основе анализа разработана классификация ошибок, включающая в себя ошибки выбора процедуры, ошибки исполнения процедуры, ошибки навигации и ошибки коммуникации (рисунок 4).

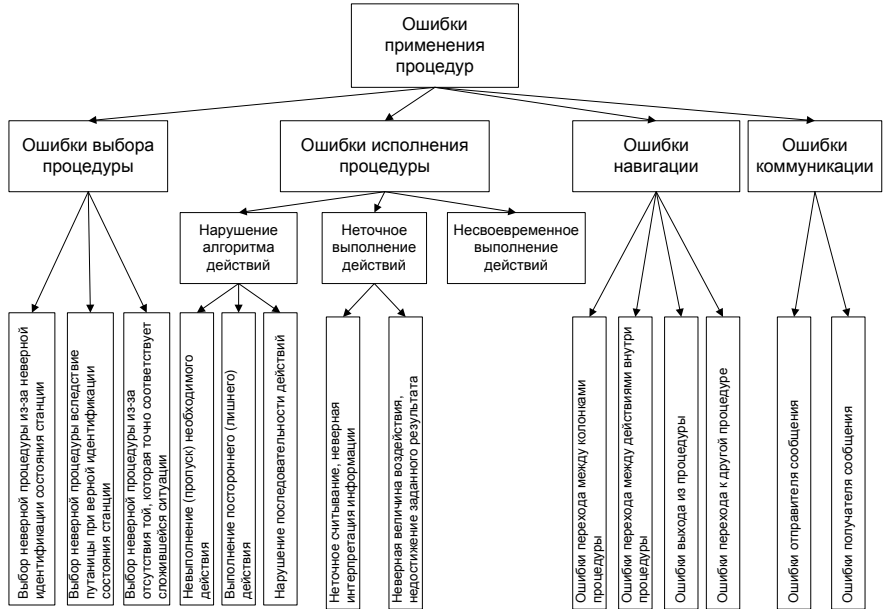


Рисунок 4 – Классификация ошибок применения процедур

В ходе экспериментальных прогонов сценариев на ПМТ была зарегистрирована 21 ошибка, включая 12 ошибок исполнения, 8 ошибок навигации и 1 ошибку коммуникации. Ошибки навигации отмечались, в основном, для симптомно-ориентированных процедур, имеющих разветвленную сеть внутренних и внешних переходов.

Затем с помощью экспертов – инструкторов ПМТ были проанализированы причины ошибок, разделенные на три класса: индивидуальные качества операторов, групповое взаимодействие и недостатки процедур (рисунок 5). Конкретные недостатки, ставшие причинами ошибок операторов, были выявлены в ходе эргономического анализа процедур, проведенного по упомянутой в главе 2 методике. Полученные результаты анализа причин ошибочных действий операторов БПУ коррелируют с предположениями и выводами других авторов и результатами экспертного опроса, описанного в главе 2.

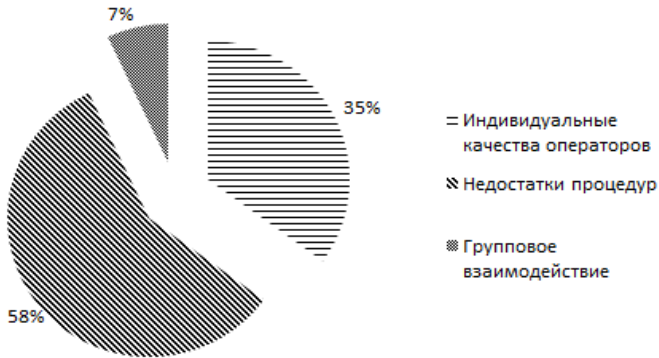


Рисунок 5 – Вклад причин в совершение ошибок операторами

Одним из способов компенсации или освобождения от указанных недостатков является создание системы компьютеризованных процедур (СКП). Основной научной проблемой, сопровождающей разработку СКП, является представление разнородных знаний, имеющих в процедурах.

В **четвертой главе** описан разработанный метод представления знаний эксплуатационных процедур. В состав этих знаний входят:

- знания о технологическом оборудовании, его связях и поведении;
- знания о технологических средах и их поведении;
- алгоритмы принятия решений и управления;
- прочие знания и информация.

Для представления знаний процедур предлагается использовать двухуровневую семантическую сеть. На верхнем, *интенциональном уровне* представляются обобщенные объекты, классы, категории и отношения между ними. На нижнем, *экстенциональном уровне* строятся семантические сети для каждого конкретного технологического параметра, элемента или группы оборудования. *Шаблоны*, накладываемые на экстенциональные сети, позволяют диагностировать ситуацию и принимать решения.

В работе предложены две интенциональные сети – для представления технологических сред (параметров) (рисунок 6) и технологического оборудования (рисунок 7). Для каждой сети приводится подробное описание всех вершин и отношений между ними, описываются примеры реализации сетей для технологического оборудования АЭС – БРУ-К и технологического параметра – уровня в КД и приводятся примеры шаблонов для идентификации симптомов процедур, связанных с данным оборудованием и параметром.

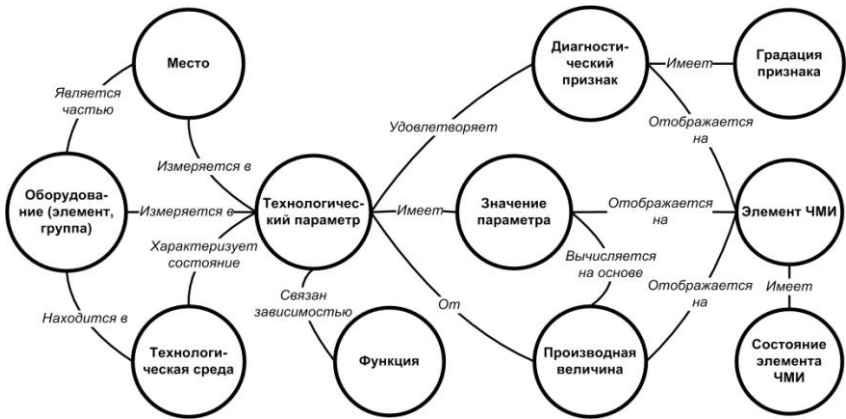


Рисунок 6 – Интенциональная семантическая сеть для описания технологического параметра

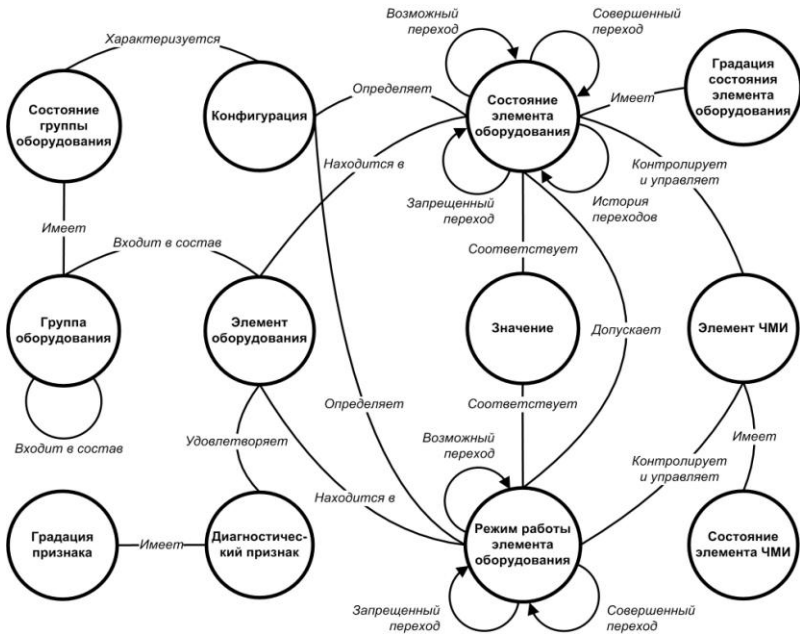


Рисунок 7 – Интенциональная семантическая сеть для описания технологического оборудования

На основе изложенного метода представления знаний был создан прототип СКП. В **приложении Б** описаны назначение, функции, архитектура, заложенные алгоритмы работы и режимы функционирования прототипа СКП, а также приведены фрагменты пользовательского интерфейса.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты настоящей работы состоят в следующем.

1. Выполнена классификация эксплуатационных процедур.  
2. Предложена структура, состоящая из 23 характеристик процедур, объединенных в 4 категории: характеристики алгоритма, эргономические характеристики, характеристики входа в процедуру и выхода из нее, характеристики сложности. В ходе систематизации и анализа структуры характеристик эксплуатационных процедур:

- обоснована полнота этой структуры;
- оценено влияние данных характеристик на надежность оператора;
- разработана методика эргономической оценки процедур; в результате апробации этой методики для комплекта инструкций по ликвидации аварий Балаковской АЭС выявлены типичные недостатки процедур, способные послужить причиной ошибок операторов.

3. Разработана методика анализа речевой коммуникации как основной части групповой деятельности оперативного персонала БПУ АЭС. Методика основана на классификации актов коммуникации (информационное сообщение, запрос-ответ, обсуждение, доклад о действии, выполненном без команды, команда-действие и запрос на выполнение действия), их структурной декомпозиции и применении аппарата случайных процессов для количественной оценки наложения шума на коммуникацию операторов.

В ходе анализа выявлены факторы, влияющие на коммуникацию: шум на БПУ, сложное информационное содержание актов, использование профессионального сленга, привлечение внимания к сообщениям. Выполнена количественная оценка влияния шума на речевую коммуникацию. Оценка показала, что от 5 до 15 % общего объема коммуникации происходит на фоне звуковой сигнализации и от 10 до 18 % – на фоне звуковой сигнализации и разговоров с операторами по месту.

4. Выполнен анализ влияния подхода к управлению, заложенного в процедуру, на деятельность операторов БПУ. Результаты анализа подтверждают полезность симптомных процедур в условиях наложения исходных событий, а также демонстрируют существенное влияние разветвленных сетей переходов на возникновение ошибок.

5. Предложена классификация специфических ошибок операторов, обусловленных недостатками процедур. Классификация включает в себя 15 типов ошибок, разделенных на 4 класса: ошибки выбора процедуры, ошибки исполнения процедуры, ошибки навигации и ошибки коммуникации. Из 21 ошибки, зарегистрированной в ходе

экспериментальных прогонов сценариев на ПМТ, 57 % составляют ошибки исполнения, 38 % – ошибки навигации и 5 % – ошибки коммуникации. При этом более 50 % всех ошибок обусловлено недостатками процедур.

6. Разработан метод представления знаний, извлекаемых из процедур. Метод апробирован на примере реализации прототипа СКП для поддержки операторов БПУ АЭС при действии в условиях нештатной ситуации.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Анохин А.Н., Плешакова Н.В., Чепурко В.А. Системный анализ устной коммуникации между операторами БПУ АЭС в аварийных ситуациях // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – №4. – С. 5–16.

2. Плешакова Н.В., Анохин А.Н. Представление декларативных знаний, содержащихся в аварийных процедурах для АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – №2. – С. 61–74.

3. Плешакова Н.В. Анализ применения аварийных процедур оперативным персоналом БПУ АС // Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2012. – №3 (43). – С. 72–83.

4. Плешакова Н.В., Анохин А.Н. Анализ ошибок, допускаемых операторами БПУ АЭС при использовании эксплуатационных процедур // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – №4. – С. 45–57.

5. Pleshakova N.V., Anokhin A.N. Study of verbal communication between nuclear plant control room operators during abnormal situations / Contemporary Ergonomics 2009 // Edited by P.D. Bust. – London: Taylor & Francis, 2009. – P. 135–144.

6. Плешакова Н.В., Анохин А.Н. Эргономическая оценка аварийных процедур для операторов АЭС // Человеческий фактор: Проблемы психологии и эргономики. – 2013. – № 3 (66). – С. 58–62.

7. Плешакова Н.В., Анохин А.Н. Управление знаниями аварийных процедур для поддержки операторов БЩУ АС // Безопасность АЭС и подготовка кадров 2013. Сборник трудов XIII Международной конференции (Обнинск, 1–5 октября 2013). – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2013. – С. 155–160.

По теме диссертации опубликовано 40 печатных работ, однако ввиду ограниченного объема автореферата выше приведены только семь наиболее значимых из них.

Компьютерная верстка Н.В.Плешакова

---

ЛР № 02713 от 27.04.1998

---

Подписано к печати 16.10.2014

Формат бумаги 60×84/16

---

Печать ризограф.

Бумага МВ

Печ. л. 1,0

Заказ №

Тираж 100 экз.

Цена договорная

---

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