

СИСТЕМНЫЙ И ЭРГОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕДУР КАК ПЕРВЫЙ ЭТАП СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРИЗОВАННЫХ ПРОЦЕДУР ДЛЯ ОПЕРАТОРОВ БЛОЧНЫХ ЩИТОВ УПРАВЛЕНИЯ АС

Н. В. Плешакова, А. Н. Анохин¹

Учебно-тренировочный центр «Атомтехэнерго» ОАО «Атомтехэнерго» (смоленский филиал)

¹Обнинский институт атомной энергетики-НИЯУ «МИФИ»

Введение

Управление энергоблоком атомной станции (АС) осуществляется оперативным персоналом блочных щитов управления (БЩУ) и является непростой задачей вследствие высокой сложности объекта управления, большой ответственности и стресса, испытываемого операторами в аварийных ситуациях. Одним из наиболее существенных факторов, влияющих на деятельность персонала, является качество документации, регламентирующей его поведение, в частности, аварийных инструкций. Суммарный объем инструкций для операторов современного БЩУ может достигать нескольких тысяч страниц текста. Все инструкции классифицируются в зависимости от решаемых задач и исходного состояния АС: от процедур реакции на сигнал, инструкций по ликвидации проектных аварий до руководств по управлению тяжелыми авариями и планов действий в чрезвычайных ситуациях.

Качество отдельной процедуры можно охарактеризовать следующими показателями: различимость данной процедуры среди подобных, полнота, организация навигации, качество формулировок, уровень детализации, структура действий, оптимальность алгоритма, эргономичность и др. Все выявленные характеристики и показатели инструкций можно разделить на четыре группы: цель и назначение, адекватность, эргономичность, сложность.

Данная работа посвящена системному и эргономическому анализу аварийных инструкций, а также анализу влияния выявленных характеристик инструкций на безошибочность и эффективность работы человека-оператора. Работа является первым этапом на пути создания системы компьютеризованных аварийных процедур (СКП). Опыт показывает, что посредством использования подобной системы можно избежать ряда проблем, возникающих в процессе применения бумажных процедур. СКП облегчает применение инструкций, осуществляет когнитивную поддержку оператора, предоставляет необходимую информацию, тем самым уменьшая вероятность ошибок управления и позволяя персоналу сконцентрироваться на решении стратегических задач управления и принятии решений.

Анализ и структура характеристик аварийных инструкций

Качество инструкций можно оценить по четырем критериям: цель и назначение, адекватность, эргономичность и сложность. Структура характеристик процедур приведена на рисунке. Рассмотрим каждый класс характеристик более подробно.

1. Цель и назначение

Цель

Множество состояний АЭС, достигаемое в случае успешного выполнения инструкции.

Назначение

Класс состояний АЭС, для которого применима данная инструкция.

Подход к управлению

Заложенный в инструкцию подход к управлению АЭС (событийный, симптомно-ориентированный, функциональный).

2. Адекватность

Способ входа

Действия, выполняемые для выбора и активации необходимой инструкции: идентификация симптомов (для симптомно-ориентированных процедур), идентификация исходного события (для событийно-ориентированных процедур), идентификация состояний функций (при использовании функционального подхода к управлению).

Качество входа и выхода

Однозначность и непротиворечивость условий входа и выхода из инструкции. Выход из инструкции предполагает установление факта, что работа по данной инструкции должна быть прекращена. Характеристика определяет однозначность и наблюдаемость условий входа, а также пересечение с условиями входа других инструкций.

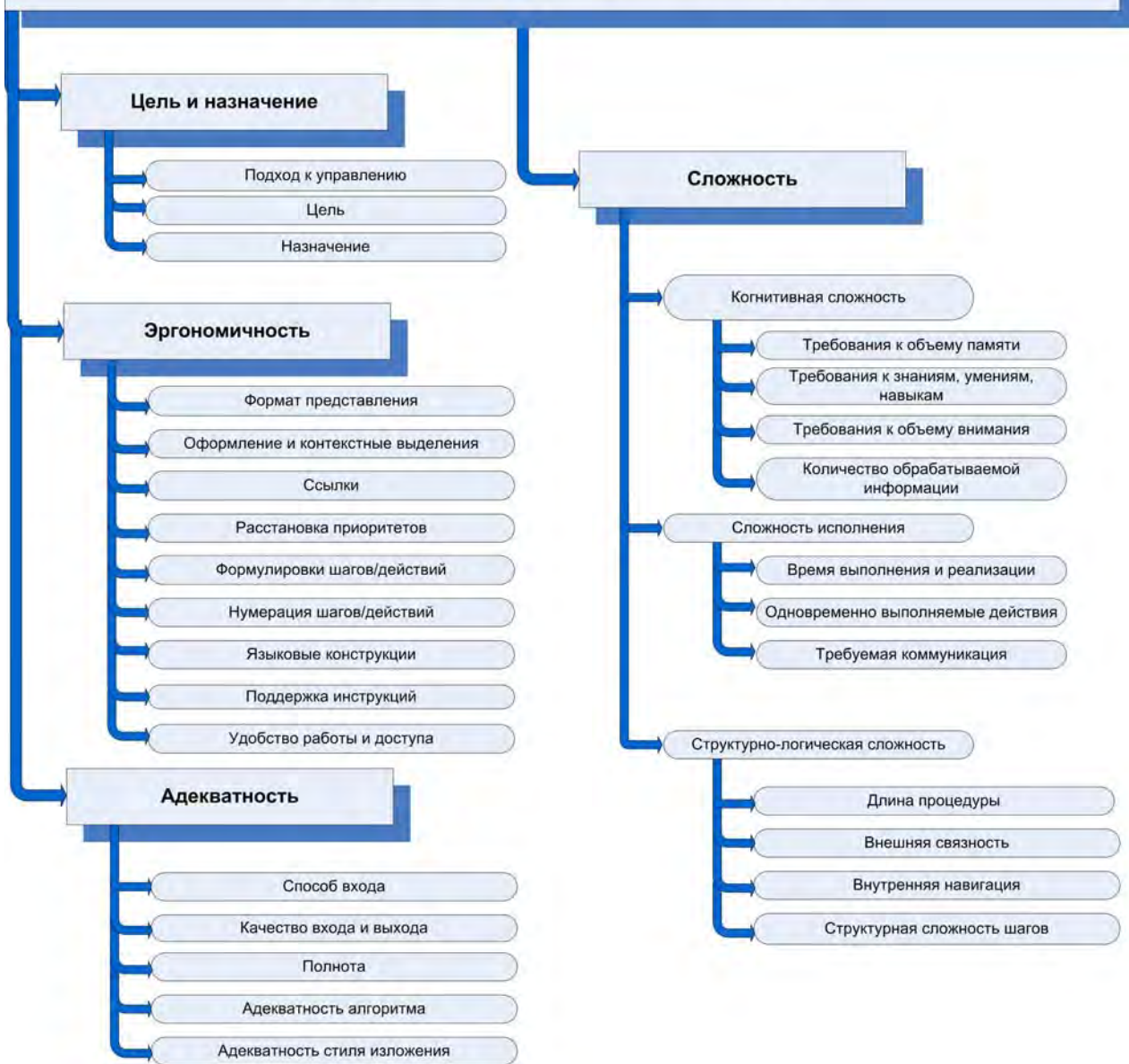
Полнота

Учет в процедуре различных вариантов развития ситуации на АЭС, наличие альтернативных действий, предпринимаемых в случае безуспешного выполнения основных действий.

Адекватность алгоритма

Эффективность, ясность и выполнимость заложенного в инструкцию алгоритма с точки зрения возможности достижения цели данной инструкции, в т. ч. при неуспешном выполнении отдельных действий.

Характеристики эксплуатационных инструкций



Структура характеристик аварийных инструкций

Адекватность стиля изложения

Использование в инструкции ясных, точных, однозначных и согласованных с другими техническими документами терминов и формулировок, точной и однозначной маркировки оборудования и обозначений технологических параметров.

3. Эргономичность

Формат представления

Используемый в инструкции формат представления (текстовый, табличный и графический); качество и ясность отображения внутренних и внешних связей процедуры.

Оформление и контекстные выделения

Шрифты, цвета, выбранные для написания шагов, действий и других структурных элементов (заголовка, предупреждений, замечаний и др.) инструк-

ции, использование графических объектов (рисунков, схем и др.), разграничение элементов одноуровневых списков и др., выделение в тексте инструкций важных (критических) действий, а также шагов навигации, предупреждений, предостережений, замечаний.

Языковые конструкции

Простота, ясность и соблюдение иных требований к языковым конструкциям (например, отсутствие двойных отрицаний), единая структура написания шагов и действий, одинаковое использование квантификаторов, конструкций ЕСЛИ-ТО и т. д.

Расстановка приоритетов

Упорядочение равноправных действий шага или альтернативных действий по предпочтительности их выполнения и написание в инструкции в соответствующем порядке.

Ссылки

Необходимость, правомерность применяемых в инструкции ссылок, единообразие их оформления; наличие и доступность источников информации, на которые имеются ссылки.

Формулировки шагов и действий

Единообразие, лаконичность, простота и ясность написания формулировок шагов и действий инструкций. Соответствие формулировок эргономическим стандартам и требованиям русского языка.

Нумерация шагов и действий

Применение определенных, единых для всех инструкций, правил для нумерации шагов, действий и т. д.

Поддержка инструкций

Способ представления инструкций (бумажные, компьютеризированные).

Удобство работы и доступа

Объем инструкций, их доступность с рабочего места и удобство работы.

4. Сложность

4.1. Структурно-логическая сложность

Длина процедуры

Количество шагов и действий инструкции.

Внешняя связность

Количество и правомерность связей и возможных перемещений между данной инструкцией и другими инструкциями и технической документацией.

Внутренняя связность

Количество и оптимальность взаимосвязей и возможных перемещений между структурными элементами инструкции, например, между различными шагами (действиями), шагами и предупреждениями, параллельно выполняемыми шагами, причинно-следственными элементами, элементами, имеющими временную зависимость (типа старт-финиш) и др.

Структурная сложность шагов

Глубина вложенности шагов и действий инструкции друг в друга.

4.2. Когнитивная сложность

Требования к объему памяти оператора

Количество элементов информации, которое должен удерживать в памяти оператор на протяжении работы с инструкцией.

Требования к объему внимания оператора

Количество элементов, на которое должен распределять свое внимание оператор на протяжении работы с инструкцией.

Требования к знаниям, умениям и навыкам

Знания, умения и навыки, которыми должен владеть оператор для успешного применения данной инструкции.

Количество обрабатываемой информации

Количество информации, которое приходится анализировать оператору для выполнения того или иного шага инструкции.

4.3. Сложность исполнения

Требуемая коммуникация

Предполагаемое время, которое должны затратить операторы на прочтение, озвучивание шагов и

действий инструкции; объем коммуникации операторов, необходимый для реализации инструкции.

Одновременно выполняемые действия

Возможность физической реализации действий инструкции каждым оператором; наличие и количество одновременно выполняемых каждым оператором действий на протяжении работы с инструкцией.

Время выполнения и реализация

Предполагаемое время реализации отдельных шагов инструкции, а также инструкции в целом, с учетом количества действий в шаге, удаленности органов управления, продолжительности протекания физических процессов на ЭБ, требуемой коммуникации и других факторов.

Объектом исследования в настоящей работе являются событийно-ориентированные и симптомно-ориентированные инструкции по ликвидации аварий, представленные в формате двухколоночных таблиц.

Описание методики исследования

Исследования деятельности операторов, их коммуникации и работы с аварийными инструкциями проводились на полномасштабном тренажере (ПМТ) энергоблока ВВЭР-1000 (проект 320) Балаковской АЭС. Эксперимент состоял в наблюдении за работой смены БЩУ при отработке аварийного сценария, моделирующего наложение двух событий, – течи в парогенераторе из первого контура во второй и течи из первого контура в гермооболочку. При этом второе событие моделировалось через некоторое время после возникновения первого.

В эксперименте участвовали четыре смены операторов БЩУ. Каждая смена состояла из четырех человек: ведущих инженеров управления реактором (ВИУР) и турбиной (ВИУТ), начальника смены реакторного цеха (НСРЦ) и НСБ. Две смены работали по симптомно-ориентированным инструкциям (СОАИ), две – по событийно-ориентированным (САИ). В качестве анализируемых инструкций был взят комплект инструкций по ликвидации аварии на Балаковской АЭС.

Действия операторов фиксировались на видеокамеру, велась регистрация 23 необходимых технологических параметров, а также всех воздействий на органы управления и технологических событий (срабатывания сигнализации, переключения оборудования). В ходе эксперимента операторами было использовано 9 различных инструкций, реализовано 79 шагов инструкций, совершено 529 актов коммуникации операторов между собой и с операторами по месту.

В ходе обработки результатов экспериментов был проведен иерархический и временной анализ задач, интервьюирование инструкторов ПМТ и оперативного персонала, обсуждение потенциальных и совершенных ошибок, хронометраж видеозаписей, анализ оперативных переговоров на БЩУ, эргономическая оценка инструкций. Это позволило:

- выполнить системный и эргономический анализ событийных и симптомно-ориентированных инструкций по ликвидации аварий на Балаковской АЭС и оценить влияние характеристик инструкций на деятельность операторов БЩУ;

- классифицировать ошибки, допускаемые операторами, и определить основные причины данных ошибок;

- разработать рекомендации по улучшению аварийных инструкций.

Анализ аварийных инструкций и влияние их характеристик на деятельность операторов БЩУ

Мировой опыт применения инструкций показывает значительное влияние их характеристик на выполнение задач операторами, а именно:

- *полнота инструкции и адекватность алгоритма* влияют на ошибки операторов при выполнении задач, вероятность возникновения серьезных аварий, гибкость деятельности и легкость адаптации алгоритма инструкции, планирование и выработку целей в случае возникновения непредвиденных условий;

- *адекватность стиля изложения и техническая точность* влияют на вероятность возникновения ошибок операторов при выполнении действий, коммуникацию, понимание инструкций;

- *формат представления* может влиять на надежность, однако однозначного ответа на вопрос, какой из форматов представления наиболее предпочтителен, нет;

- *оформление*, а именно, неуместное использование или нехватка графических объектов, неверно подобранные цвета и шрифты и т. д., может повлиять на вероятность возникновения ошибок операторов;

- *языковые конструкции, формулировки шагов и действий* влияют на коммуникацию операторов, понимание инструкции и однозначность интерпретаций команд инструкции;

- *поддержка инструкций*, например, представление в компьютеризированной форме, облегчает навигацию по инструкциям, выполнение задач за счет чувствительности к контексту ситуации и изменения уровня детализации и т. д.;

- *внешняя связность* может служить источником ошибок операторов, затруднить использование комплекта инструкций, поскольку операторы могут столкнуться с «несовместимостью» различных инструкций;

- *структурная сложность шагов*, например, излишняя детализация или включение шагов, не являющихся необходимыми, приводит к тому, что операторы избегают таких инструкций; и наоборот, излишнее обобщение вызывает непонимание или неверное толкование инструкций, отклонение от них;

- *чрезмерная когнитивная сложность* затрудняет деятельность операторов, превышая когнитивные возможности человека, вызывает ошибки при выполнении задач и ошибки коммуникации;

- *сложность исполнения инструкции* влияет на стиль поведения операторов: низкая и высокая сложность влечет строгое следование инструкции, в то время как средняя сложность приводит к пропуску шагов и модификации последовательности действий инструкций; кроме того, сложные инструкции увеличивают вероятность отклонения от инструкции в результате непонимания ее требований операторами;

- *сложность исполнения шага инструкции* влияет на время выполнения данного шага: чем больше сложность, тем больше времени требуется оператору для его реализации.

Анализ экспериментальных данных во многом доказал правдивость результатов мирового опыта. Кроме того, были сделаны следующие выводы и наблюдения:

- многие процедуры плохо различимы из-за схожести симптомов и не всегда четко обозначенных условий входа; это может привести к неверному выбору процедуры оператором;

- процедуры не могут учесть все возможные варианты развития ситуации и не всегда основаны на оптимальных алгоритмах. Это приводит к увеличению времени приведения блока в стабильное состояние, а также к тому, что операторы в своих действиях часто отклоняются от хода процедуры и теряют ее логику, возвращаясь к ранее выполненным шагам. Например, в трех экспериментах из четырех на повторный анализ и контроль уже выполненных действий было потрачено от 110 до 350 с;

- навигация, т. е. переходы внутри и между процедурами, может как улучшить структуру и объем процедуры, так и затруднить ее использование. В экспериментах операторы допустили пять ошибок внутренней навигации и две ошибки неверного перехода к другим процедурам;

- чтение и озвучивание шагов процедур зависит от их формулировок и степени детализации. Часто операторы ограничиваются чтением только крупных шагов и не переходят к детальным действиям, озвучивая частично от 38 до 67 % шагов;

- эргономичность процедуры, т. е. удобство ее применения, зависит от ряда факторов: принятых цветовых решений, контекстного выделения критических для управления действий, визуального разделения альтернативных действий и др. Анализ показал, что восприятие и выполнение оператором шага процедуры затрудняется, если данный шаг содержит слишком много альтернатив, которые, к тому же, не всегда упорядочены по приоритетности выполнения. Кроме того, как отмечали операторы в своих интервью, в условиях дефицита времени во избежание ошибок важно выделять в процедурах критические действия, чего сделано не было.

Ошибки операторов БЦУ при использовании инструкций и их причины

Ошибки, допускаемые операторами при использовании инструкций, были разбиты на два больших класса: 1) ошибки при оценке ситуации и выборе инструкции, когда операторы изначально выбирают неверную инструкцию и начинают ее исполнять; 2) ошибки реализации инструкций (по принципу «не то, не так и не вовремя»). Ошибки второго класса могут быть трех типов: ошибки навигации по «процедурному полю», ошибки реализации совокупности шагов и действий и ошибки выполнения отдельного шага/действия.

В соответствии с выделенными классами и типами в проведенных экспериментах было выявлено 22 ошибки операторов (табл. 1). Как видно из таблицы, ошибок выбора инструкции обнаружено не было. Это говорит о довольно высоком опыте и классификации персонала. Все выявленные ошибки относились к ошибкам выполнения процедур, среди которых преобладали ошибки реализации отдельных шагов и их совокупностей. Основной вклад внесли ошибки пропуска действий (в сумме семь по всем экспериментам), ошибки контроля и нарушения постусловий шага (по две в прогонах). Также было допущено по одной ошибке письменной и устной коммуникации, проверки предусловия шага, диагностики и принятия решения, пропуска альтернативных действий. Ошибки навигации также встречались при анализе. В основном, они касались ошибок перехода внутри инструкции.

Таблица 1

Ошибки операторов в экспериментах

Класс ошибки	Тип ошибки	Эксперимент				Σ	Всего
		1	2	3	4		
Ошибка выбора процедуры		0	0	0	0	0	0
Ошибка выполнения процедур	Ошибки навигации	0	2	0	3	5	22
	Ошибки реализации совокупности шагов и действий	2	2	4	0	8	
	Ошибки выполнения шагов/действий	1	4	1	3	9	

Анализ ошибок повлек за собой детальный анализ их причин. Было выделено три больших класса причин ошибок: личные качества персонала БЦУ АС, качество инструкций и коммуникации.

От личных качеств операторов во многом зависит успешность и эффективность ликвидации аварийной ситуации. К таким качествам относят тренированность, профессиональную подготовку, опыт, стиль управления, внимательность, лидерство, умение контролировать ситуацию и т. д. Маленький опыт и слабая профессиональная подготовка могут

привести к неадекватной оценке ситуации, неверному планированию действий и неправильному исполнению. Невнимательность приводит к пропуску важной информации, а неумение контролировать ситуацию чревато опасными последствиями.

В последнее время значительное внимание уделяется взаимодействию и коммуникации операторов смены как одной из наиболее существенных причин ошибочных действий. Коммуникация может быть устной (тогда вина лежит либо на отправителе, который предоставляет сообщение в неприемлемой для получателя форме, либо на получателе, который неверно воспринимает информацию) или письменной (тогда вина лежит на инструкциях, содержащих ошибочные данные, вызывающие ошибки коммуникации).

Третий класс – качество инструкций, которые могут служить причиной некорректных действий персонала. Как уже было сказано ранее, качество инструкций определяется определенным множеством их характеристик.

Причины ошибок, выявленные в ходе анализа проведенных экспериментов, представлены в табл. 2.

Обработка данных экспериментов показала, что более половины ошибок полностью или частично совершается по вине недостатков инструкций. Это говорит о важности и необходимости совершенствования инструкций.

Обсуждение и выводы

Таким образом, в работе был выполнен системный и эргономический анализ событийных и симптомно-ориентированных инструкций по ликвидации аварий Балаковской АЭС, что позволило выявить характеристики инструкций, наиболее сильно влияющие на качество деятельности оперативного персонала БЦУ АС.

В ходе выполнения работы стало очевидным, что ряда проблем, связанных с применением бумажной документации, можно избежать посредством разработки и внедрения системы компьютеризованных процедур (СКП). Применение СКП позволяет существенно облегчить работу операторов за счет автоматической навигации по процедурам, чувствительности к контексту ситуации, изменения уровня детализации шагов и действий, переключения форматов представления инструкций (текста, таблицы, блок-схемы) и поддержки когнитивных процессов (сбора информации, анализа, принятия решений). Основная научная проблема, сопровождающая разработку и внедрение СКП, состоит в создании метода кодирования знаний процедур, который зависит не только от природы самих знаний, но и от того, в какой форме эти знания уже существуют и используются операторами в их работе.

Знания эксплуатационных процедур включают в себя: 1) знания о технологическом оборудовании, его связях и поведении; 2) знания о технологических средах и их поведении; 3) алгоритмы принятия решений и управления; 4) прочие знания и информацию.

Причины ошибок персонала БЩУ АС

Класс причин ошибок	Причина	
Личные качества	Невнимательность	
	Маленький опыт работы с инструкцией	
	Излишняя суета и торопливость, приводящая к потере логики движения по процедурам, неверной диагностике, оценке ситуации и принятии решений	
Коммуникация	Несоответствие инструкций текущей конфигурации БЩУ АС, неоптимальные и устаревшие действия (адекватность стиля изложения инструкции)	
	Созвучность технических обозначений некоторого оборудования (например, насосы ТК и TQ)	
	Характеристика инструкции	Реализация характеристики
Качество инструкций	Способ входа	Отсутствие диагностического алгоритма, однозначно выводящего на требуемую инструкцию
	Качество входа и выхода	Нечеткие, «размытые» симптомы и условия входа в инструкции
	Полнота	Отсутствие альтернативного шага, если не получен результат при выполнении основного шага
		Инструкция не всегда «отвечает» развитию реальной ситуации
		Условия в основном и альтернативном шаге не описывают все варианты развития событий
	Адекватность алгоритма	Неясная логика инструкции, вызывающая замешательство операторов
		Несоответствие темпа движения по инструкции и скорости ликвидации аварии
	Контекстные выделения	Шаги навигации не выделены визуально
	Оформление	Невыделение небольших шагов
		Неразделение равнозначных альтернатив шага
	Языковые конструкции	Некорректная формулировка шага, двойные отрицания в формулировках
	Формулировки шагов и действий	Нечеткие условия действий инструкций
	Внутренняя связность	Навигация перегружена и сложна
		Не указаны необходимые условия, без которых невозможно начало выполнения действия
Структурная сложность	Излишне громоздкие шаги, содержащие перегруженную альтернативную часть	
	Излишняя детализация (обобщение) некоторых шагов инструкций	

В настоящее время авторами дорабатывается метод представления знаний, основанный на применении двухуровневой семантической сети. На верхнем, *интенциональном* уровне с помощью семантической сети представляются обобщенные объекты, классы, категории и отношения между ними. В работе предложены две интенциональные сети – для описания технологического оборудования и технологических сред. На нижнем, *экстенциональном* уровне строятся семантические сети для каждого конкретного технологического параметра, элемента или группы оборуду-

ования. *Шаблоны*, накладываемые на экстенциональные сети, позволяют диагностировать ситуацию и принимать решения.

Таким образом, развитием и логическим продолжением данной работы станет создание системы компьютеризованных аварийных процедур для персонала БЩУ АС, которая облегчит применение инструкций, уменьшит вероятность ошибок управления и позволит персоналу не отвлекаться на рутинные задачи, а сконцентрироваться на решении стратегических задач управления и принятии решений.