

АНАЛИЗ ОШИБОК, ДОПУСКАЕМЫХ ОПЕРАТОРАМИ БЩУ АЭС ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПРОЦЕДУР

Н.В. Плешакова*, А.Н. Анохин**

** Смоленский филиал учебно-тренировочный центр «Атомтехэнерго»*

ОАО «Атомтехэнерго», г. Десногорск

*** Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск*



Статья посвящена проблеме ошибок операторов БЩУ АЭС, совершаемых при использовании эксплуатационных процедур. Предложено разбиение этих ошибок на четыре класса: ошибки выбора процедуры, ошибки исполнения процедуры, ошибки навигации и ошибки коммуникации. Подробно рассматриваются и анализируются выделенные классы ошибок. Ошибки каждого типа иллюстрируются реальными примерами. Проанализированы причины допускаемых ошибок, среди которых основную долю занимают недостатки процедур. Выявлены два аспекта двухколоночных симптомно-ориентированных процедур, наиболее существенно влияющих на деятельность операторов: запутанная логика перехода из левой колонки в правую и отсутствие средств визуального выделения элементов процедуры.

Ключевые слова: атомная станция, блочный щит управления, оператор, процедура, ошибка, классификация, причина ошибки.

Key words: nuclear power plant, main control room, operator, procedure, error, categorization, cause of error.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что от 15 до 40% всех аварий и от 20 до 80% всех нарушений на атомных электростанциях (АЭС) происходят вследствие ошибок человека-оператора [17]. Анализ ошибок оператора посвящено множество исследований, в которых приводится статистика ошибок, анализ их причин и классификация ошибочных действий (или бездействия) оператора. Ошибки классифицируются по различным критериям [1–3]: а) по типу психического процесса (ошибки восприятия, мышления, моторики, коммуникации); б) по фазам решения задачи (ошибки наблюдения, диагностики, планирования, исполнения, взаимодействия с автоматикой); в) по внешним проявлениям (ошибки пропуска, выполнения, избыточных действий, несвоевременное и неточное выполнение); г) по типу поведения, при котором они проявляются (ошибки на уровне навыков, правил, знаний). Последняя классификация основана на «лестничной» модели поведения, предложенной Й. Расмуссоном, который в [6] описал алгоритм диагностирования когнитивных аспектов этих

ошибок на этапах диагностики, выбора цели и стратегии, адаптации и выполнения процедур. В [4] приводится классификация ошибок, состоящих в выполнении человеком действий над неверным объектом, в неверное время, в неверной последовательности, а также рассматриваются качественные и количественные недостатки функционирования оператора. В [5] была предпринята попытка проведения многомерной классификации, где ошибки персонала разделялись по типу психического процесса, по характеру ошибочного действия и по уровню поведения.

Классификация ошибок тесно связана с оценкой вероятности и выявлением факторов, влияющих на их возникновение. Среди методов оценки вероятности, ставших уже классическими для процедур вероятностного анализа безопасности АЭС, выделяются Technique for Human Error Rate Prediction (THERP), Accident Sequence Evaluation Program (ASEP), Human Cognitive Reliability (HCR), Cause-Based Decision Tree (CBDT) Method, Success Likelihood Index Methodology (SLIM), Failure Likelihood Index Methodology (FLIM), A Technique for Human Event Analysis (ATHEANA), Revised Systematic Human Action Reliability Procedure (SHARP1). Наиболее «свежий» обзор этих методов сделан в [20]. В отечественной практике важную роль занимает обобщенный структурный метод А.И. Губинского [15]. Наряду с «устоявшимися» методами в последние годы появляются новые подходы, например, метод оценки вероятности ошибок, основанный на модели обработки информации и учитывающий влияние на деятельность персонала АЭС восьми факторов: доступное время, стресс и стрессоры, опыт и тренировка, сложность, эргономика, включая человеко-машинный интерфейс (ЧМИ), процедуры, рабочие процессы, готовность к работе. В [8] представлен метод анализа когнитивной надежности и ошибок (Cognitive Reliability and Error Analysis Method – CREAM), базирующийся на принципах когнитивного моделирования. В [9] подчеркивается, что для уменьшения ошибок человека необходимо, среди прочего, выполнять анализ эксплуатационных инструкций, структурный анализ задач оператора, оценивать вероятность возникновения единичных отказов и их комбинаций.

Традиционно выделяемыми причинами ошибок являются личные качества и мотивация операторов, эргономическое обеспечение их деятельности, эксплуатационные процедуры, организационные факторы, уровень подготовленности персонала и др. Общепризнано, что эксплуатационные процедуры являются довольно существенным вкладчиком в вероятность ошибок операторов [7]. По разным статистическим данным они служат прямой или косвенной причиной 15 – 30% ошибочных действий. При этом, разные исследователи вкладывают различное содержание в связь между процедурой и ошибкой. Практически все сходятся в том, что основными факторами являются отсутствие релевантной процедуры или неадекватный алгоритм, заложенный в процедуру. С другой стороны, сюда часто включают недостатки не эксплуатационных, а организационных процедур и даже отступление операторов от процедуры. К сожалению, дальнейшая детализация факторов влияния процедуры на ошибки операторов практически отсутствует, и лишь немногочисленные публикации касаются анализа работы операторов с процедурами и влияния на их работу таких аспектов, как сложность процедуры [12], адекватность алгоритма процедуры, техническая точность и формат представления процедуры [10, 11] и др.

Упоминая процедуры, исследователи редко пытаются классифицировать ошибки, связанные непосредственно с применением операторами процедур. Например, в [13] определены ошибки выбора процедуры (неверный выбор, излишняя процедура и др.) и ее исполнения (шаг пропущен, неверная последовательность, шаг незавершен и др.). Если рассматривать исполнение процедуры как реализацию ее

алгоритма, то можно отметить классификацию [14], где выделяются ошибки пропуска, включения, следования, замещения, выполнения (качества) и своевременности шагов. Тем не менее, ни одна из существующих классификаций не дает детального описания ошибок работы с процедурами, не учитывает ошибки навигации по «процедурному полю» и ошибки коммуникации, связанные с чтением и восприятием команд инструкций. Настоящая работа нацелена на заполнение этого пробела и посвящена анализу ошибок, совершаемых операторами БЩУ АЭС при использовании эксплуатационных процедур.

ВЛИЯНИЕ ТИПА ПРОЦЕДУР НА ХАРАКТЕР ОШИБОК ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Выполненная в работе [19] классификация эксплуатационных процедур для АЭС подразделяет их по четырем признакам: по используемому в них подходу к управлению, по формату их представления, по физическому носителю процедуры и по классу состояний АЭС, для которого эти процедуры предназначены. Можно предположить, что особенности процедур разного типа способны спровоцировать различные по характеру ошибки операторов. Начнем с рассмотрения того, как заложенный в процедуру подход к управлению может повлиять на безошибочность действий операторов.

Как известно, сегодня на станциях используются три **подхода к управлению**:

- *событийно-ориентированный* (событийный), при котором управление осуществляется на основании точной идентификации происшедшего события;
- *симптомно-ориентированный* (симптомный), при котором управление строится на основе наблюдаемых симптомов и без классификации события и ситуации в целом;
- *функционально-ориентированный* (функциональный), при котором объектом управления является не оборудование, а функции, исполняемые системами АЭС.

От применяемого подхода зависят способ выбора операторами релевантной процедуры, понимание логики процедуры и, зачастую, эффективность действий при различных классах состояний АЭС. Как правило, событийные инструкции основаны на простом линейном алгоритме действий, не содержат ветвлений и переходов, а потому выглядят логичными и понятными. Такая простота снижает вероятность ошибочных действий, однако требует от персонала точного определения происшедшего события. Ошибка в идентификации события автоматически приводит операторов к выбору неверной процедуры. Такие ошибки вполне вероятны в сложных стрессогенных ситуациях при дефиците времени и особенно в тех случаях, когда существуют «внешне» похожие друг на друга (т.е. обладающие схожими симптомами) ситуации. Другая опасность, исходящая от событийного подхода, состоит в том, что в непредвиденных ситуациях операторы вообще остаются без процедуры «один на один» с проблемой. Кроме того, событийный подход «плохо работает» при наложении друг на друга нескольких постулированных исходных событий. Одновременное применение нескольких процедур может привести операторов к противоречивым взаимоисключающим действиям.

Симптомная инструкция позволяет операторам действовать верно вне зависимости от происшедшего события, однако требует досконального безоговорочного следования написанным пунктам и контроля множества симптомов перед выполнением действий. Симптомная инструкция универсальна и обычно охватывает сразу множество ситуаций, и потому внутренняя логика такой процедуры довольно запутанна и не всегда совпадает с логикой операторов и их субъективным пониманием ситуации. Это приводит к «механическому» исполнению шагов процедуры, что требует от операторов высокой самодисциплины и тщательности. В та-

ких обстоятельствах совершение ошибки вполне вероятно. Кроме того, алгоритмы симптомных процедур являются очень разветвленными, а многочисленные внутренние и внешние переходы также создают почву для ошибочных действий.

Другим фактором, влияющим на характер совершаемых ошибок, является **формат представления** процедуры. Наиболее распространенными форматами являются представления процедуры в виде

- линейного списка текстовых предписаний;
- блок-схемы или графической карты действий операторов;
- двухколоночной таблицы, левая часть которой содержит перечень основных действий, а правая – альтернативные действия, выполняемые, если основное действие не привело к ожидаемому результату.

Текстовые процедуры наиболее компактны и удобны для опытных операторов. Однако в них практически невозможно отобразить разветвленные алгоритмы, содержащие условные и безусловные переходы и сложные логические конструкции. Их представление в слабо формализованном текстовом виде может неоднозначно трактоваться операторами и приводить их к ошибкам.

Блок-схемы, наоборот, очень удобны для представления сложных алгоритмов, которые одновременно окидываются одним взглядом, а операторы могут видеть, где они находятся и куда движутся. С другой стороны, недостатком графического формата является большой размер и перегруженность листов, высокая чувствительность к качеству исполнения (цветам, шрифтам, контрастности и др.), а также субъективизм их восприятия – часть людей легко и быстро адаптируются к таким формам, в то время как другие испытывают сложности. Особую проблему при чтении блок-схем создает недостаточная освещенность и неудачное графическое оформление. При запутанном алгоритме в графических процедурах есть вероятность потери текущей позиции и логики процедуры. Описание действий, вписанное в геометрическую фигуру (прямоугольник, ромб и др.), ограничивается размером этой фигуры и зачастую содержит сокращения и укороченные формулировки, которые могут неточно восприниматься операторами. Наряду с блок-схемами, отображающими процедуру целиком, известны и другие виды графических форматов, например, карты действий, описывающие алгоритмы действий индивидуально для каждого из операторов БЩУ. Особенностью этих процедур является проблема координации действий операторов, работающих каждой со своей картой.

Двухколоночный формат является текстовым по форме, однако, традиционно, хорошо структурированным по содержанию. Все действия процедуры декомпозированы на шаги, назначенные конкретным исполнителям. В левой колонке приводятся основные действия, в правой – альтернативные, осуществляемые, если результат выполнения основного действия не получен.

Важным моментом является то, что отсутствием результата считается не только отсутствие ожидаемого эффекта от выполнения действия, но и получение отрицательного ответа операции контроля. Так, для действия «открытием БРУ-К установить скорость расхолаживания 30°С/ч» отсутствие результата – это *неуспешное* выполнение действия, например, не удалось открыть БРУ-К или добиться требуемого уровня расхолаживания. В то же время для действия «проконтролировать давление первого контура более 100 кгс/см²» под отсутствием результата понимается давление менее 100 кгс/см², которое было зафиксировано оператором вследствие *успешного* выполнения действия. При этом неуспешное действие – это невозможность проконтролировать давление, например, из-за выхода из строя прибора или задымления БЩУ. Подобное смешение понятий может стать потенциальной причиной ошибок.

Двухколоночный формат так же, как и текстовый, не очень удобен для представления сложных алгоритмов, содержащих большое число переходов и ветвлений. В силу специфики табличного представления текста такие процедуры, как правило, являются физически довольно объемными, что затрудняет их просмотр, перелистывание и поиск нужной инструкции. Правая часть, зачастую содержащая несколько неупорядоченных по приоритетам альтернативных действий, бывает перегружена, что затрудняет исполнение процедуры [10]. Исследования работы операторов с двухколоночными процедурами показали, что сложные или очень простые задачи выполняются в большинстве случаев в строгом соответствии с процедурой, тогда как выполнение задач средней сложности сопряжено с модификацией алгоритма и пропуском избыточных, по мнению персонала, действий [12].

КЛАССИФИКАЦИЯ ОШИБОК ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕДУР

В рамках данного исследования анализировалась работа персонала с инструкциями по ликвидации проектных аварий на АЭС, выполненными в форме двухколоночных таблиц. Использовались два идентичных по содержанию комплекта процедур: процедуры первого комплекта были событийно-ориентированными, второго комплекта – симптомно-ориентированными.

Процедуры применялись операторами БЩУ АЭС при решении задачи по ликвидации аварийной ситуации на энергоблоке ВВЭР-1000, состоящей в наложении двух исходных событий – течи в парогенераторе из первого контура во второй и течи из первого контура в гермооболочку (ГО) реактора. В эксперименте на полномасштабном тренажере [19] участвовали четыре смены БЩУ, каждая из которых включала в себя четырех операторов: ведущих инженеров управления реактором (ВИУР) и турбиной (ВИУТ), начальников смен реакторного цеха (НСРЦ) и

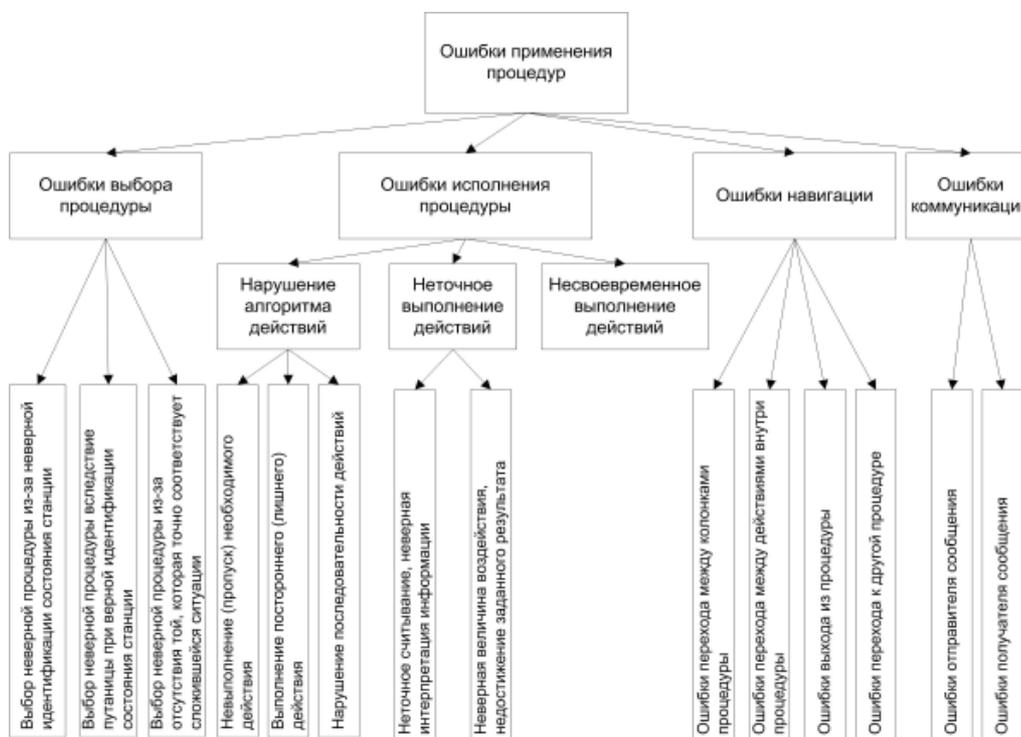


Рис. 1. Классификация ошибок применения эксплуатационных процедур

блока (НСБ). Две смены работали по симптомным процедурам, две – по событийным. Комплект процедур имелся только у НСБ, который зачитывал их вслух, выдавал устные команды и координировал действия членов смены.

В ходе пошагового анализа действий операторов БЩУ, проводимого с участием самих операторов и инструкторов полномасштабного тренажера, были выявлены более 20-ти ошибок, связанных с применением процедур. Эти ошибки были разделены на четыре класса: ошибки выбора процедуры, исполнения процедуры, навигации и коммуникации. Полная классификация ошибок приведена на рис. 1. Рассмотрим их более подробно.

Ошибки выбора процедуры

Первая группа ошибок – выбор неадекватной процедуры – соответствует понятию *функционально-целевого* отказа, введенного А.И. Губинским [15]. Суть отказов данного типа состоит в том, что человек может правильно исполнить предписанный ему алгоритм действий, но при этом преследовать заведомо ложную цель. Такой отказ может реализоваться в выборе неверной процедуры

- из-за *неверной идентификации состояния* станции;
- вследствие *путаницы* при верной идентификации состояния станции;
- из-за *отсутствия* той, которая точно соответствует сложившейся ситуации.

Ошибки подобного типа могут быть допущены операторами, например, при наложении нескольких исходных событий (когда применимы сразу несколько процедур) или при схожести симптомов разных процедур. Например, процедуры для разрыва трубопроводов первого контура большого диаметра и некомпенсируемых течей теплоносителя первого контура содержат 12 и 10 входных симптомов соответственно. По существу, все десять симптомов второй процедуры входят и в первую: восемь из них полностью идентичны, а два – идентичны с точностью до формулировки (например, в первой процедуре указано, что «давление падает в течение 20–100 с до 5 кгс/см²», а во второй – «быстрое снижение давления»).

Ошибки исполнения процедуры

Ошибки, допускаемые при исполнении процедуры, хорошо описываются классификацией функциональных отказов, предложенной А.И. Губинским [15]. В соответствии с этой классификацией ошибки исполнения подразделяются на

- функционально-алгоритмические отказы – нарушение предписанного алгоритма выполнения действий;
- функционально-временные отказы – несвоевременное (раньше или позже предписанного момента времени) выполнение действий;
- функционально-параметрические отказы – неточное выполнение действий.

Для детализации *функционально-алгоритмических* отказов можно использовать классификацию, описанную в работах В.Ф. Венды [16] и других авторов и разделяющую такие ошибки на три типа: пропуск действия, выполнение лишнего действия и нарушение последовательности действий.

Невыполнение (пропуск) необходимого действия. В проводимом эксперименте НСБ не заметил шаг процедуры «Включить на первый контур насосы 4ТQ14,24,34D01», возможно из-за краткости его формулировки. Понимание того, что действие было пропущено, пришло только через 3 мин, когда ВИУР запросил у НСБ разрешение на включение этих насосов. Наряду с простым пропуском к ошибкам этого типа относятся случаи, когда операторы, не достигнув успеха при выполнении основного действия, не переходят к выполнению альтернативного действия (*примечание: такие ошибки возможны только при исполнении двухколоночных процедур, и их можно также отнести к ошибкам навигации, т.е. перехода из*

левой колонки в правую). Всего в экспериментах было допущено пять ошибок данного типа, что составило около 25% от общего количества зафиксированных ошибок применения процедур. Связаны эти ошибки были, в основном, с невнимательностью операторов. Однако следует отметить, что допущены они были только при работе с симптомно-ориентированными процедурами, возможно, из-за их более громоздкого алгоритма действий по сравнению с событийными.

Выполнение постороннего (лишнего) действия. Обычно причиной ошибок данного типа является несоответствие алгоритма процедуры реальному развитию ситуации. Это приводит к тому, что операторы «теряют» логику процедуры и начинают действовать в соответствии со своим опытом, выполняя действия, не указанные в процедуре. Наряду с этим операторы могут выполнять некоторые действия повторно, также «теряя» при этом логику процедуры. Выполнение операторами одного-двух лишних действий, не указанных в процедуре, было зафиксировано во всех экспериментах. Основной причиной этого стало возникновение второго события (течи в ГО) и отсутствие в процедурах алгоритма действий для подобного развития ситуации. На такое повторное выполнение шагов было потрачено от двух до шести минут (при общей продолжительности сценария от 30-ти до 45-ти мин).

Нарушение последовательности действий. Ошибки данного типа возможны лишь для тех фрагментов процедуры, где последовательность выполнения действий важна, например, когда некоторые шаги могут выполняться только по достижении результата предыдущих. Перестановка действий может и не влиять на результат, однако сам факт изменения последовательности говорит о том, что операторы, выполняя процедуру, в ряде случаев опираются на свою память и опыт, а не на текст инструкции. Для процедур в текстовом формате, предписывающих действия одновременно трем членам смены БЩУ, было бы полезно выработать удобный способ выделения действий, которые могут выполняться в любой последовательности, и действий, для которых порядок является важным.

Функционально-временные отказы (или несвоевременное выполнение действий) относят к действиям, привязанным к временной шкале. Привязка ко времени обычно проявляется в ограничении скорости исполнения или во введении временного ограничения: как снизу – в виде совершения необходимой задержки, так и сверху – в виде имеющегося запаса времени. Такие ограничения могут служить инструментом временной синхронизации двух и более действий, например, «проконтролировать отключение КАГ-24 через 2 мин после закрытия СРК».

Функционально-параметрические отказы – это довольно обширная категория ошибок, состоящих в неточном или ненадлежащем исполнении действия. Регистрация таких ошибок возможна лишь тогда, когда существуют определенные критерии качества выполнения действия. Для операций восприятия и оценки информации параметрические ошибки – это неверные считывание или интерпретация информации, в то время как для моторных операций – неверная величина воздействия или недостижение заданного результата. Рассмотрим несколько примеров.

1. Неточное считывание или неверная интерпретация (восприятие) информации возможны как в простых операциях контроля, так и в операциях, сочетающих контроль и действие. Например, выполняя простой шаг контроля «Проверить, что уровень в поврежденном ПГ *менее* 375 см», НСБ в одном из тестовых прогонов констатировал: «У нас *более*», тогда как реальный уровень в тот момент составлял 340 см. Неточное считывание привело к тому, что НСБ перешел к правой колонке и выполнил предписываемый ей уход в другой раздел инструкции. Примером сочетания контроля и воздействия является шаг: «Если температура тепло-

носителя первого контура менее 265°C и уменьшается, то прекратить сброс пара на БРУ-К, БРУ-А, БРУ-СН». Здесь восприятие информации – это, по существу, проверка того, соблюдены ли необходимые предпосылки (предварительные условия) для выполнения действия. В данном примере две предпосылки – температура менее 265°C и температура уменьшается.

2. Неверная величина воздействия или недостижение заданного результата могут быть вызваны как неправильным исполнением самого действия, так и неверным пониманием его цели. Так, выполняя шаг «Поддерживать температуру первого контура стабильной 220°C сбросом пара через БРУ-А неповрежденных ПГ», оператор должен периодически приоткрывать и закрывать клапаны БРУ-А. При этом он может совершать слишком резкие воздействия, которые приведут к существенным колебаниям температуры вместо ее стабилизации.

Во втором примере выполняется шаг «Для достижения минимально-допустимой концентрации борной кислоты ввести в первый контур не менее 30 м³ раствора Н₃ВО₃ насосами TQ14,24,34D01». Простое точное выполнение этого действия, т.е. включение насосов и ввод 30 м³ борной кислоты, не гарантирует достижение необходимой концентрации в первом контуре. Для успешного завершения действия операторы должны убедиться, что данная концентрация достигнута, несмотря на то, что в инструкции отсутствует прямое указание проконтролировать этот факт (*примечание: цель действия достигается не всегда, например, из-за неисправного оборудования или сложившихся специфических условий*).

Некоторые действия могут иметь довольно сложную внутреннюю структуру. Так, шаг «При давлении первого контура 100 кгс/см² включить на первый контур насосы TQ13,23,33D01» (*примечание: насосы аварийного охлаждения активной зоны высокого давления*) означает не только включение насосов, но и открытие задвижек TQ13(23,33)S26 на всасывающих трубопроводах. В одном из прогонов операторы забыли их открыть, в результате чего расход насосов был снижен до нуля, что привело к снижению давления в контуре.

Ошибки навигации

Эти ошибки наиболее распространены для «толстых» комплектов процедур, содержащих большое количество внутренних и внешних переходов. Ошибка перехода состоит в пропуске этого перехода или неверном его выполнении (в переходе не туда, куда нужно). Ошибки навигации можно разделить на четыре типа:

- ошибки перехода из левой колонки в правую (или ошибки перехода между колонками) для двухколоночных процедур;
- ошибки перехода между действиями внутри процедуры;
- ошибки выхода из процедуры;
- ошибки перехода к другой процедуре.

1). *Ошибки перехода между колонками* – это пропуск перехода, когда он нужен, и выполнение перехода, когда он не нужен. Примером лишнего перехода является ошибка, совершенная при выполнении шага «Проконтролировать ГЦН – по крайней мере, один в работе». В обсуждаемой ситуации ГЦН находились в работе, и это означало, что проверяемое условие удовлетворено и операторы могут переходить к следующему пункту процедуры. Однако НСБ, правильно проконтролировав работу ГЦН, принял решение о переходе в правую колонку. ВИУР указал ему на ошибку, однако НСБ, восприняв информацию, не изменил решение.

Зачастую ошибки перехода из левой колонки в правую возникают из-за некорректного выполнения операции в левой колонке. Особую сложность представляют операции логического типа, примеры которых уже обсуждались при описании влияния двухколоночных процедур на характер ошибок («Проконтролировать

давление первого контура более 100 кгс/см²) и при описании ошибки неточного считывания и неверной интерпретации («Проверить, что уровень в поврежденном ПГ менее 375 см»). Еще хуже, когда операция в левой колонке содержит сложную логическую конструкцию, например, «Проконтролировать давление во всех ПГ: давление в любом ПГ падает нерегулируемым образом ИЛИ давление в любом ПГ полностью потеряно». При выполнении данного шага имел место следующий диалог.

НСБ: «Проконтролировать давление во всех парогенераторах».

НСРЦ: «Давление во всех парогенераторах 56,8».

НСБ: «Я вижу...».

Давление 56,8 кгс/см² не означает «полную потерю» или «нерегулируемое падение». Иначе говоря, «результат данного шага достигнут не был», и, следовательно, операторы должны перейти к правой колонке, чего в анализируемом случае не произошло.

Возможно, некоторую путаницу в логическую проверку добавляет конфликт эмоциональных окрасок. Напомним, что условием перехода к правой колонке является недостижение результата шага из левой колонки. В случае воздействия на объект управления (например, при открытии клапана, вводе борной кислоты и т.п.) недостижение несет отрицательную эмоциональную окраску. Иначе говоря, переход к правой колонке происходит, если что-то ненормально и идет не так, как хотелось бы. Однако в примере с давлением в ПГ переход в правую колонку должен выполняться, когда с парогенераторами все в порядке. И наоборот, если давление в них бесконтрольно падает (очевидно, что это плохо), операторы должны констатировать, что данный шаг завершился успешно.

Возможно, явление конфликта эмоциональных окрасок можно устранить с помощью инверсии логического условия в операции левой колонки. Однако это не всегда можно сделать, не прибегая к использованию отрицательных конструкций (содержащих элемент «НЕ»), которых категорически следует избегать при написании процедур (*примечание: последняя фраза иллюстрирует, почему следует избегать использования отрицательных конструкций – фраза становится запутанной и трудно воспринимаемой*).

К сожалению, идентификация ошибок перехода из левой колонки в правую затруднена, т.к. сложно провести четкую границу между неправильным выполнением операции в левой колонке и собственно неправильным переходом. Так, в примере с уровнем в ПГ 375 см оператор неправильно выполнил действие левой колонки – неверно считал уровень. Далее он руководствовался возникшим у него ложным представлением и выполнил ровно то, что из него следовало – перешел в правую колонку. В примере с давлением в ПГ оператор корректно выполнил действие левой колонки и правильно понял ситуацию, однако не перешел в правую колонку. Очевидно, что «чистая» ошибка навигации состоит в том, что оператор правильно осознает ситуацию, которая сопряжена с переходом, однако не делает этот переход и наоборот.

2). *Ошибки перехода между действиями* внутри одной процедуры также довольно распространены. Внутренние переходы обозначаются в процедурах фразами «перейти к...» или «вернуться к...». Невыполнение этих команд может нарушить логику запланированных действий по ликвидации аварии. В проведенных экспериментах были зафиксированы четыре такие ошибки, три из которых состояли в простом пропуске переходов.

3). *Ошибки выхода из процедуры* состоят в невыполнении команды «Выйти из раздела». Такие команды означают, что цель данной процедуры достигнута, и рас-

полагаются в конце или, реже, внутри процедуры. В проведенных экспериментах операторы лишь однажды допустили такую ошибку, что было скорее всего вызвано невыразительным графическим исполнением команды – надпись «Выйти из раздела» визуально выглядела как составная часть формулировки шага и просто осталась незамеченной.

4). *Ошибки перехода к другой процедуре.* Переход в другую процедуру может указываться явно и неявно. При явном указании в процедуру включается команда, например, «Перейти к разделу 3.4 «Расхолаживание способом естественной циркуляции». Неявное указание – это постоянно действующие правила, например, при нарушении критических функций безопасности (КФБ) перейти к работе по руководству по управлению запроектными авариями. Учитывая, что мониторинг КФБ – отдельная непростая задача, такой переход может быть легко пропущен. Так, в одном из прогонов наблюдалось нарушение сразу двух КФБ, однако НСБ принял решение о продолжении работы по текущей процедуре.

Как уже отмечалось, ошибки навигации по процедурам довольно распространены. Экспериментальные прогоны показали, что таким ошибкам особенно подвержены двухколоночные симптомно-ориентированные процедуры, имеющие разветвленную сеть внутренних и внешних переходов.

Ошибки коммуникации

Подробный анализ устной коммуникации операторов БЩУ в обсуждаемых прогонах был выполнен в статье [21]. В ходе этого анализа были выявлены следующие типы коммуникационных ошибок:

1) *ошибки отправителя сообщения* – неверное прочтение команд вслух, ошибочные запросы значений параметров и состояния оборудования при выполнении операций контроля;

2) *ошибки получателя сообщения* – отсутствие репетования (повторения озвученной команды), неверное истолкование отданных команд, искажение воспринимаемой информации вследствие шума на БЩУ и других причин.

В ходе отдачи команды (прочтения вслух шага процедуры) отправитель сообщения может по каким-то причинам вносить изменения в его содержание, как, например, в диалоге:

НСБ: «После увеличения уровня в КД до 11 м поддерживать его на этом значении *уменьшением подпитки* и *увеличением продувки* первого контура»;

ВИУР: «Отключаю TQ14»;

НСБ: «*Увеличь подпитку*, а *продувку оставь* на прежнем уровне. 11 метров держи в КД»;

ВИУР: «Принял, 11 метров в КД».

Зачитав шаг процедуры, НСБ затем изменил его формулировку. Трудно сказать, была ли это ошибка чтения, невнимательность или осознанное изменение команды.

ПРИЧИНЫ ОШИБОК ОПЕРАТОРОВ ПРИ РАБОТЕ С ПРОЦЕДУРАМИ

Анализ большинства выявленных ошибок сопровождался тщательным анализом их причин, которые были разделены на три класса: личные качества операторов, групповое взаимодействие и характеристики процедур. Их вклад в совершение зарегистрированных ошибок показан на рис. 2. К *личным качествам* были отнесены небольшой опыт работы с двухколоночными процедурами в табличном формате, невнимательность, небрежность и излишняя суетливость. Недостатки *группового взаимодействия* проявились в устной коммуникации, происходившей на фоне существенного шума сигнализации и переговоров, а также недостаточно четкого соблюдения регламента переговоров.

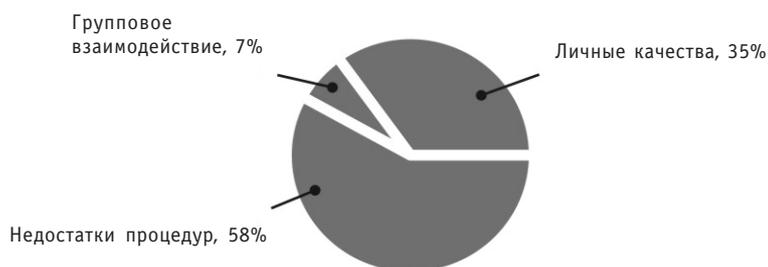


Рис. 2. Вклад причин в совершение ошибок

Доминирующим вкладчиком в совершение ошибок стали *недостатки процедур*, детализация которых приведена в табл. 1. Необходимо отметить, что полученные результаты коррелируют с предположениями и выводами других авторов [10, 11, 18].

Таблица 1

Недостатки процедур, послужившие (и способные послужить) причиной ошибок операторов

Характеристика процедуры *	Недостатки, связанные с характеристикой процедуры
Условия входа	Отсутствие диагностического алгоритма, однозначно выводящего на требуемую процедуру
Качество входа	Нечеткие, «размытые» симптомы и условия входа в процедуру
Полнота	Отсутствие альтернативного шага, если не получен результат при выполнении основного шага
	Инструкция не всегда «отвечает» развитию реальной ситуации
	Условия в основном и альтернативном шагах не описывают все варианты развития событий
Эффективность алгоритма	Неясная логика инструкции, вызывающая замешательство операторов
	Несоответствие темпа движения по инструкции требуемой скорости ликвидации аварии
Оформление и контекстные выделения	Шаги навигации не выделены визуально
	Небольшие шаги не отделены визуально от других шагов
	Равнозначные альтернативы шага визуально не разделены
Формулировки шагов и действий, языковые конструкции	Некорректная формулировка шага, использование двойных отрицаний
	Громоздкость формулировок
	Перегруженная альтернативная часть шагов
	Нечеткие формулировки условий действий
	Излишняя детализация (или обобщение) шагов
Термины и обозначения	Несоответствие обозначений в процедурах текущей конфигурации БЩУ
	Устаревшие действия в процедурах
	Фонетическая созвучность обозначений оборудования (например, ТК и ТQ)
Структурная сложность	Перегруженность и сложность переходов
	Не указаны необходимые условия, без которых невозможно начало выполнения действия

* Примечание: характеристики процедур даны в соответствии с классификацией, введенной в [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполняя сравнительный [19] и эргономический [22] анализы событийно- и симптомно-ориентированных процедур, авторы не планировали выделять рассмотрение ошибок в отдельную тему. Вопрос классификации и анализа ошибок АЭС достаточно подробно освещен в многочисленных книгах, статьях и отчетах, незначительная часть из которых упомянута в начале данной статьи. Однако по мере углубления анализа стало ясно, что в ряде случаев именно определенные качества некоторых процедур становятся причиной весьма специфических ошибок, которые не возникли бы при работе с другими процедурами. Это и послужило поводом исследования и классификации таких ошибок.

Очевидно, что каждый тип и формат представления процедур порождают свой характер ошибок. Данная статья сконцентрирована на исследовании двухколоночных симптомно-ориентированных процедур.

Первый важный вывод, который можно сделать из этого исследования, касается проблем с логикой перехода из левой колонки в правую, заложенных в самой идеологии двухколоночного формата. Чаще всего эти проблемы возникают при выполнении операций проверки из левого столбца. Проверка может затрудняться тем, что предмет проверки изложен в текстовом виде, который неэффективен для представления логических конструкций. В этих условиях необходимо очень тщательно относиться к текстовым формулировкам действий.

Вторая важная проблема состоит в банальном игнорировании графических приемов, таких как визуальное выделение элементов навигации, визуальное структурирование элементов текста, которые могли бы существенно упростить работу операторов с процедурами. Это особенно важно в условиях высокой структурной и алгоритмической сложности, которой обладают симптомно-ориентированные процедуры.

Выявленные потенциальные (и реальные) проблемы помогут избежать ошибок при написании процедур в дальнейшем, а также могут быть приняты во внимание при расследовании учетных событий на АЭС, связанных с ошибками операторов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность персоналу полномасштабного тренажера учебно-тренировочного центра Балаковской АЭС за интересные и содержательные дискуссии, а также за терпеливый разбор задач управления энергоблоком.

Литература

1. Чачко С.А. Предотвращение ошибок операторов на АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1992.
2. Reason J. Human error. – NY: Cambridge University Press, 1990.
3. Суэйна А., Миллер Д. Ошибки человека и его надежность/В кн.: Человеческий фактор (в 6-ти томах). Том 1/ Под ред. Г. Салвенди. – М.: Мир, 1991. – С. 360-417.
4. Lee J., Park G., Sim B. Analysis of human errors in trip cases of Korean NPPs//Journal of the Korean Nuclear Society. - 1996. – Vol. 28. – № 6. – P. 563-575.
5. Анохин А.Н. Анализ деятельности оператора: модели и методы: Учебное пособие. – Обнинск: ИАТЭ, 1992.
6. Rasmussen J. Human errors: a taxonomy for describing human malfunction in industrial installations//Journal of Occupational Accidents. – 1982. – Vol. 4. – № 2-4. – P. 311-335.
7. Gertman D., Blackman H., Marble J. et al. The SPAR-H human reliability analysis method (NUREG/CR-6883). - Washington, D.C.: USNRC, 2005.
8. Hollnagel E. Reliability Analysis and Operator Modeling//Reliability Engineering and System Safety. – 1996. – Vol. 52. – № 3. – P. 327-337.

9. Periodic Safety Review of Nuclear Power Plant: Safety guide. – Vienna: IAEA, 2003.
10. Holy Y. New emergency procedures of Westinghouse type from point of view of human factors and human reliability/Proceedings of the International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment (PSA '99) (Washington, D.C., August 22-26, 1999).
11. Barnes V., Haagensen B., OHara J. The human performance evaluation process: a resource for reviewing the identification and resolution of human performance problems (NUREG/CR-6751). – Washington, D.C.: USNRC, 2001.
12. Park J., Jung W. The operators non-compliance behavior to conduct emergency operating procedures – comparing with the complexity of the procedural steps // Journal of the Korean Nuclear Society. – 2003. – Vol. 35, № 5. – P. 412-425.
13. Rouse W., Rouse S. Analysis and classification of human error // IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics. – 1983. – Vol. SMC-13 (4). – P.539-549.
14. Деревянкин А.А. Исследование, разработка и применение методов оценки надежности персонала при проведении вероятностного анализа безопасности атомных станций: диссертация к.т.н. – М., 1991.
15. Губинский А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем. – Л.: Наука, 1982.
16. Венда В.Ф. Системы гибридного интеллекта: Эволюция, психология, информатика. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
17. Анохин А.Н., Острейковский В.А. Вопросы эргономики в ядерной энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 344 с.
18. OHara J., Higgins J., Stabler W. Computerization of nuclear power plant emergency operating procedures (BNL-NUREG-67216). – NY: Brookhaven National Laboratory Upton, 2000.
19. Плешакова Н.В. Анализ применения аварийных процедур оперативным персоналом БЩУ АС//Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2012. – № 3 (43).
20. Forester J., Kolaczowski A., Lois E. et al. Evaluation of human reliability analysis methods against good practices (NUREG-1842). – Washington, D.C.: USNRC, 2006.
21. Анохин А.Н., Плешакова Н.В., Чепурко В.А. Системный анализ устной коммуникации между операторами БЩУ АЭС в аварийных ситуациях//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 4. – С. 5-16.
22. Анохин А.Н., Плешакова Н.В., Майорчикова М.С. Эргономическая оценка и системный анализ процедур для управления энергоблоком АЭС/Диагностика и прогнозирование состояния сложных систем: Сб. научн. тр. № 17 кафедры АСУ / Под ред. д.т.н., проф. А.В. Антонова. – Обнинск: ИАТЭ, 2007. – С. 68-77.

Поступила в редакцию 21.11.2012

ABSTRACTS OF THE PAPERS**УДК 621.039.51**

New Technique to Reformat Multigroup Cross-Sections for Monte-Carlo Calculation \I.R. Suslov, I.V. Tormyshev, K.G. Mel'nikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 8 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References, 21 titles.

New method to calculate equiprobability bins from Legendre expansion scattering cross-sections is proposed. The method uses a correction of equiprobability bins boundaries to provide a conservation of the first angular moment. The code CRSRD-ST to reformat cross sections from DTF to ACE format with proposed technique is developed. Numerical results shows the method proposed significantly improves an agreement between deterministic and Monte-Carlo calculations.

УДК 621.039.51

Boundary Resonance Effects in the Fast Reactor with the Heterogeneous Core \A.A. Bezborodov, E.V. Dolgov, D.A. Klinov, V.V. Kolesov, V.Yu. Stogov, I.R. Suslov, V.I. Folomeev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 10 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 10 titles.

Boundary resonance effects is considering with the application of the high-speed subgroup approximation technique employment in practical tasks for description of neutron cross-sections interactions with media nuclides nuclei in resonance part of energy for physical simulation of the fast reactor plants with the heterogeneous core.

УДК 621.039.51

Energy Deposition Evaluation in the Target with Uranium-Containing Material for the ⁹⁹Mo Production in WWR-C Reactor with the Improved Design of Target \O.Yu. Kochnov, V.V. Kolesov, R.V. Fomin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 7 pages, 2 tables, 9 illustrations. – References, 2 titles.

Increased production of the ⁹⁹Mo in the context of rising global demand is an urgent task. The new type of target for ⁹⁹Mo producing in WWR-c reactor technological channels was developed. A series of calculations to estimate energy deposition for standard and modified target were done. A considerable energy deposition increasing in modified target was found.

УДК 621.039.56

Method of ¹⁶N Generation for Test of Radiation Controlled Channels on Nuclear Power Stations with Water-Cooled Reactors \V.A. Khryachkov, I.P. Bondarenko, P.A. Dvornikov, B.V. Zhuravlev, S.N. Kovtun, T.A. Khromyleva, A.V. Pavlov, N.G. Roschin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 5 pages, 3 illustrations. – References, 3 titles.

The preferences of ¹⁹F(n,α)¹⁶N nuclear reaction use for radiation control channels test on water-cooled power reactors are analyzed. The new measurements for more accurate determination of ¹⁹F(n,α)¹⁶N reaction cross section energy dependence have been carried out. A set of new methods for background reducing and improvement of events determination reliability was developed.

УДК 621.039.524.44:697.93

Calculation-based Justification for the Algorithm of Pipelines Leak Control by Air Humidity \P.A. Dvornikov, S.N. Kovtun, A.A. Budarin, V.P. Polionov, N.N. Titarenko, D.M. Shvetsov, N.G. Roshchin, A.L. Matveev, E.L. Matveev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 10 pages, 9 tables, 3 illustrations. – References, 9 titles.

Dynamic processes in thermal insulation of power plants pipelines caused by depressurization are the goal of the research. Simulation of various leaks was realized by using adapted computer code KUPOL-M developed in SSC RF IPPE.

УДК 621.039.58

Analysis of the Errors Committed by NPP MCR Operators during Implementation of Operating Procedures \N.V. Pleshakova, A.N. Anokhin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya

energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 13 pages, 1 table, 2 illustrations. – References, 22 titles.

The present paper concentrates on the problem of errors committed by NPP MCR operators during implementation of operating procedures. It is proposed to categorize such errors into four classes as follows: selection of inappropriate procedure, incorrect execution of procedure, navigation errors, and communication errors. These categories of errors have been described and analyzed in detail in the paper. Each type of errors is illustrated by the real examples. The causes of the errors have been also investigated. It was revealed that a weaknesses of procedures is the main contributor to the committed errors. The following two aspects of two-column symptom-oriented procedures that impact on the operator activity were revealed: complicated logic which underlie the transition from the left column of procedure to the right one; and absence of tools for visual emphasis of procedure elements.

УДК 661.879:541.183

Adsorption of Molecular Iodine from Gas-aerosol Environments and Water Solutions with a New Type of an Aluminum-Silicate Sorbent | V.A. Shilin, A.B. Gorgienko, A.S. Shilina, V.K. Milinchuk; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 9 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References, 13 titles.

In the article presents the results of studies of sorption of iodine vapor from the gaze-aerosol media on aluminosilicate sorbents in static and dynamic modes. The sorption capacity of vapor of molecular iodine is 234 ± 1.0 mg/g. Factor extraction of iodine from the aerosol media during sorption under dynamic conditions is $99.5 \pm 0.2\%$. The sorption capacity of silica-alumina sorbent for iodine, dissolved in water is 254 ± 12 mg/g. Aluminosilicate sorbent, modified Ag_3CuI_4 , has a high ice-forming activity.

УДК 621.039.53

Experimental Investigations of Vertical Turbomachine Catcher Bearings | S.E. Belov, M.N. Borovkov, N.G. Kodochigov, E.G. Novinskiy; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 8 pages, 9 illustrations. – References, 6 titles.

It is a challenging engineering task to develop the GT-MHR reactor plant turbomachine catcher bearings aimed at retaining in geometric axis a flexible vertical rotor having large mass and diametrical dimensions in case of electromagnetic bearings power supply failure. The novelty and relevance of the task is determined by specific feature of turbomachine configuration, high safety requirements for bearing assemblies and absence of experience in developing such bearings worldwide. Verification of analytical procedures requires performance of comprehensive experiments in a stepwise fashion starting from small-scale models to full-scale catcher bearings specimens. For this purpose, it has been planned to perform a set of R&D activities within the GT-MHR Project.

This paper deals with the program of R&D activities aimed at development of catcher bearings for the GT-MHR turbomachine as well as some results of performed activities. The experience which is being gained as a result of this investigation program implementation can also be used in other mechanical engineering industries associated with development of vertical and dynamic machines.

УДК 621.039.564

On Electrode Polarization of Electrochemical Oxygen Sensor in Liquid Metal Coolants | Yu.A. Musikhin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 10 pages, 3 tables, 7 illustrations. – References, 28 titles.

The paper considers the main provisions of thermodynamic oxygen activity control in liquid metal coolants by the EMF method by means of a two-electrode electrochemical oxygen sensor with a solid oxygenated electrolyte which is in contact with the coolant and at the same time is a working electrode of the sensor. The sensor EMF is proportional to the oxygen activity logarithm. It has been noted that absorption of metallic impurities and oxides on the electrolyte causes polarization of the working electrode, thus reducing the EMF value and deteriorating the oxygen control accuracy. The polarization process was shown to be multifactorial and localized within the limits of double electric layer that results from the difference in the work functions of the contacting phases. The double layer characteristics are presented. The analytical dependence values were calculated for the electron work function from the solid electrolytes and metal oxides.