

АНП НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Любарский А.В., Токмачев Г.В., Федулов М.В.

АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются особенности анализа надежности персонала (АНП) на этапе разработки технического проекта атомных электростанций, поскольку наибольшее количество конкретных особенностей имеет АНП, выполняемый на стадии разработки предварительного отчета по анализу безопасности. Рассматривается текущий статус такого анализа надежности персонала, включая вопросы, связанные со сбором информации, идентификацией человеческих ошибок, качественным и количественным анализом, интеграцией в вероятностную модель оценки безопасности. Исследуются доаварийные и послеаварийные ошибки, а также ошибки, которые инициируют исходное событие. Рассмотрен анализ зависимостей между событиями. Обсуждается минимальное значение вероятности возникающих ошибок персонала.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ надежности персонала (АНП), выполняемый для проектируемых блоков, значительно отличается от АНП, выполняемого для действующих блоков, особенно для современных АЭС нового поколения, которые не имеют аналогов. Эти различия в основном связаны с целями АНП, но также и из-за конкретных условий выполнения АНП на этапе проектирования АЭС.

Проектирование блока АЭС, как правило, выполняется в несколько этапов, зависящих от процесса лицензирования в конкретной стране. Тем не менее, можно выделить три основные стадии:

- 1) Стадия разработки предварительного отчета по обоснованию безопасности (ООБ), необходимого для получения лицензии на сооружение АЭС
- 2) Стадия разработки окончательного ООБ, необходимого во многих странах для получения лицензии на эксплуатацию АЭС
- 3) Стадия ввода в эксплуатацию, на которой подтверждается, что все проектные решения, вошедшие в окончательный ООБ, а также эксплуатационная документация (регламент безопасной эксплуатации, эксплуатационные и аварийные инструкции) действительно реализованы на блоке. На этой стадии также выполняется уточненный вероятностный анализ безопасности (ВАБ), с учетом реальной реализации проектных и эксплуатационных решений.

Выполнение ВАБ на каждой из стадий является, как правило, необходимым условием для получения соответствующей лицензии, но кроме получения лицензии, результаты ВАБ используются для ряда целей, отличающихся в зависимости от стадии проекта. Соответственно, различаются подходы и требования к выполнению ВАБ, зависящие, как от целей ВАБ, так и от информации, имеющейся на конкретной стадии.

Особенно эти отличия проявляются при выполнении анализа надежности персонала (АНП).

В Таблице 1 представлены основные цели и ограничения при выполнении АНП для каждой из стадий проектирования. Таблица 1 ограничена рассмотрением АНП только для ВАБ уровня 1 для внутренних ИС. При выполнении ВАБ внутренних и внешних воздействий и ВАБ уровня 2 цели ВАБ фактически не меняются, но ограничения при выполнении АНП могут иметь существенные отличия из-за необходимости наличия информации специфического характера.

Как видно из Таблицы 1, каждая стадия проектирования имеет свои отличия с точки зрения задач и ограничений выполнения АНП и, следовательно, требования к АНП и процесс выполнения АНП могут отличаться.

Наибольшее количество конкретных особенностей имеет АНП, выполняемый на стадии разработки предварительного ООБ. Эти особенности обсуждаются в статье.

АНП НА СТАДИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ООБ СБОР ИНФОРМАЦИИ

В Таблице 2 приведен перечень типичных источников информации для выполнения АНП и проанализирована их доступность и необходимость для выполнения АНП для различных типов ошибок персонала на стадии разработки предварительного ООБ.

Таблица 1 Стадии проектирования и АНП

Стадии проектирования	Цели ВАБ	Цели АНП	Ограничения выполнения АНП
Разработка предварительного ООБ	Оптимизация проектных решений. Оценка соответствия выполнения	Выявление значимых действий оператора и возможных ошибок при их выполнении, наиболее важных с точки зрения	Нет всей информации о ряде схемных решений. Нет всей информации о

Стадии проектирования	Цели ВАБ	Цели АНП	Ограничения выполнения АНП
	<p>вероятностных показателей безопасности, заданных в нормативных документах и техническом задании к проекту блока.</p>	<p>удовлетворения целевых вероятностных показателей безопасности.</p> <p>Оптимизация проектных решений, обеспечивающих:</p> <p>а) надежное выполнение действий персонала</p> <p>б) внесение в проект блока изменений, направленных на снижение вероятности ошибок персонала или снижения значимости ошибок персонала путем внедрения резервирования действий персонала автоматикой.</p>	<p>системах автоматике.</p> <p>Отсутствуют эксплуатационные и аварийные инструкции.</p>
<p>Разработка окончательного ООБ</p>	<p>Оценка соответствия выполнения вероятностных показателей безопасности, заданных в нормативных документах и техническом</p>	<p>Реалистичная оценка вероятностей ошибок оператора.</p>	<p>У персонала отсутствует опыт работы на блоке. Эксплуатационные и аварийные инструкции находится в стадии верификации.</p>

Стадии проектирования	Цели ВАБ	Цели АНП	Ограничения выполнения АНП
	задании к проекту блока.		
Ввод в эксплуатацию	Оценка соответствия выполнения вероятностных показателей безопасности, заданных в нормативных документах и техническом задании к проекту блока.	Реалистичная оценка вероятностей ошибок оператора.	У персонала имеется опыт работы на блоке. Эксплуатационные и аварийные инструкции завершены. Разработаны и внедрены программы тренировок персонала.

Таблица 2 Типичные источники информации для АНП на стадии разработки предварительного ООБ

Описание источника	Степень полноты информации	Возможность учета информации при качественном анализе		
		Ошибки типа А	Ошибки типа В	Ошибки типа С
Инструкции	На стадии разработки предварительного ООБ инструкции отсутствуют. Имеются инструкции с блоков-	Инструкции с блоков аналогов позволяют в некоторой степени компенсировать отсутствие специфических для блока.	Инструкции с блоков аналогов мало применимы.	Инструкции с блоков аналогов мало применимы.

Описание источника	Степень полноты информации	Возможность учета информации при качественном анализе		
		Ошибки типа А	Ошибки типа В	Ошибки типа С
	аналогов ¹ , но степень их применимость и может быть крайне мала.			
Посещение блока, включая пульты управления и локальные места управления	На стадии разработки предварительного ООБ отсутствует возможность посещения. Посещение блоков-аналогов не компенсирует отсутствие информации	Невозможно	Невозможно	Посещение блоков-аналогов не компенсирует отсутствие источника информации.
Анализ эксплуатационных событий	Информация не имеет полного отношения к анализируемому блоку, но полезна для определения причин потенциальных ОП			
Интервью, обсуждения и обходы с операторами станций	Информация может быть получена только с блоков-аналогов. Как правило, используется информация из ВАБ для блоков-аналогов.			
Сбор информации с тренажера-симулятора, включая	Тоже			

¹ Под блоком-аналогом понимается референтный блок, наиболее близкий по характеристикам к проектируемому блоку

Описание источника	Степень полноты информации	Возможность учета информации при качественном анализе		
		Ошибки типа А	Ошибки типа В	Ошибки типа С
наблюдение за реакциями смены на моделируемые аварии.				
Теплогидравлические анализы.	Информация как правило имеется, но в ограниченном объеме.	Не применима	Может использоваться в некоторых случаях для оценки запасов времени у оператора	Используется в полном объеме для оценки запасов времени у оператора.
Другие части ВАБ, как правило, анализ систем и анализ аварийных последовательностей.	Данная информация разрабатывается итерационно во взаимосвязи с АНП и является основой для анализа АНП.	Используется в полном объеме для определения возможных ОП.		

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОШИБОК ПЕРСОНАЛА

На стадии разработки предварительного ООБ выявление ошибок персонала различного типа является наиболее неопределенной и важной задачей. Отсутствие окончательной информации о проектах систем и системах автоматике, а также отсутствие аварийных процедур и инструкций по эксплуатации систем приводит к необходимости вносить в анализ избыточный консерватизм, полагая возможность

совершения ошибок, которые могут быть в дальнейшем исключены техническими мерами. Собственно, исключение возможности совершения или понижение вероятности совершения значимых ошибок персонала и является одной из основных задач АНП для данной стадии проектирования, коренным образом отличающейся от выполнения АНП для других стадий проектирования и, тем более, для действующих блоков.

Как известно, в АНП рассматриваются несколько типов ошибок персонала [1]:

- 1) Ошибки типа А, совершенные при испытаниях или техническом обслуживании оборудования до наступления исходного события.
- 2) Ошибки типа В, вызывающие исходное событие.
- 3) Ошибки типа С, совершаемые персоналом при реагировании на исходное событие.

Идентификация ошибок оператора типа А

Наибольшие трудности на стадии разработки предварительного ООБ вызывает идентификация ошибок оператора типа А. Это связано с отсутствием информации о том, каким образом будет осуществляться проверка и техобслуживание оборудования, а также как будет организован контроль обеспечения возврата оборудования в работоспособное состояние после техобслуживания.

Обычной практикой при выполнении АНП на этой стадии является анализ проектов и инструкций по эксплуатации блоков-аналогов. Все до-аварийные ошибки персонала, выявленные для блоков-аналогов, рассматриваются в ВАБ анализируемого блока. Кроме того, для всего оборудования, рассматриваемого в модели ВАБ, могут определяться ошибочные действия оператора, которые могут приводить к тому или иному виду его отказа (например, приведение в закрытое положение ручной арматуры на напоре насоса после профилактических или ремонтных работ, приводящее к его неготовности).

Учитывая, что предлагаемый подход приводит к выявлению большого количества ошибок оператора типа А, на стадии разработки предварительного ООБ допускается выполнять группировку ошибок оператора для тех ошибок, которые приводят к отказам оборудования с одинаковыми последствиями с точки зрения работы систем, моделируемых в ВАБ (например, допускается постулировать одну ОП типа А, приводящую к неготовности канала или части канала системы безопасности).

Идентификация ошибок оператора типа В

Как правило, ошибки оператора типа В для действующих блоков определяются только для условий, когда предполагается значительное взаимодействие оператора с оборудованием блока (например, в режимах останова блока и перегрузки топлива). Для работы блока в стационарных режимах на мощности для действующих блоков, как правило, считается, что эти ошибки уже учтены в статистике частот исходных событий (ИС).

Для стадии разработки предварительного ООБ для проектируемого блока такой подход применим с ограничениями, в том числе по причинам, приведенным ниже:

- 1) Для ряда исходных событий на проектируемом блоке может отсутствовать статистическая информация о событиях на блоках-аналогах. Это, в первую очередь, относится к событиям, вызываемыми отказами или ложными срабатываниями систем, проект которых либо отсутствует на блоках-аналогах, либо кардинально отличается (например, система пассивного отвода тепла впервые внедрена на усовершенствованных ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 и отсутствует на референтных блоках с реакторами ВВЭР-1000/320).
- 2) Наличие зависимостей и связей, которые могут приводить к срабатыванию оборудования из-за отказа обеспечивающих систем, отсутствующих на блоках-аналогах. Примером таких зависимостей может быть ситуация, когда отказ обеспечивающей системы приводит к срабатыванию фронтальной системы из-за реализации принципа безопасного отказа [2].

Для идентификации ошибок персонала (ОП), вызывающих ИС, необходимо выполнить анализ всех систем, в рамках которого должны быть выявлены ошибки оператора, приводящие к последствиям типа ложное срабатывание или отказ системы, если такие последствия нарушают нормальную работу блока и требуют срабатывания систем важных для безопасности для сохранения безопасного состояния блока. При этом учитываются все зависимости между системами, включая зависимости, связанные с реализацией принципа безопасного отказа.

Выполнение такого анализа на этапе разработки предварительного ООБ затрудняется недостатком точной информации о связях между системами, точной информации об уставках и блокировках систем, а также информации о техобслуживании системы при работе блока на мощности. Поэтому на практике можно применять наиболее консервативный подход, полагающий, что ошибки оператора, приводящие к потере обеспечивающих систем вызывают отказ или ложное

срабатывание зависимой фронтальной системы, если нет обоснования отсутствия таких последствий.

Необходимо также отметить, что выявление ошибок, приводящих к ИС в режимах остановленного блока, имеет определенные особенности на стадии разработки предварительного ООБ из-за отсутствия инструкций по выполнению различных действий в режимах останова блока и перегрузки топлива.

На стадии разработки предварительного ООБ выявляются все возможные ИС в режимах остановленного блока и определяется потенциальная возможность их возникновения из-за ошибок оператора. На этапе разработки предварительного ООБ из рассмотрения не исключается ни одна из потенциальных ошибок.

Идентификация ошибок оператора типа С

Процедура идентификации после-аварийных ОП, включая ОП при выполнении восстанавливающих действий, практически аналогична процедуре выполнения такого анализа для действующих блоков.

Единственное отличие заключается в том, что из-за отсутствия противоаварийных инструкций выявляются все возможные действия оператора по приведению блока в безопасное состояние. Также рассматриваются все технически возможные восстанавливающие действия оператора, даже те действия, для которых в проекте технические средства определены только на концептуальном уровне.

Расширенное рассмотрение действий типа С позволяет оценить их потенциальную значимость, и в дальнейшем разработать технические и организационные меры, обеспечивающие минимизацию вероятностей ОП при их выполнении.

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ

Необходимым этапом качественного анализа ошибок оператора является сбор, анализ и документирование информации, необходимой для понимания целей выполнения АНП для специфических задач персонала, связанных с потенциальными ошибками. Такой анализ позволяет выбрать наиболее подходящий метод оценки вероятностей ошибок. Как видно из Таблицы 2, информация, необходимая для качественного анализа ОП, на стадии разработки предварительного ООБ (в отличие от АНП для действующих АЭС), крайне ограничена и не позволяет выполнить детальный анализ для большинства ОП. В связи с этим, как правило, на стадии разработки предварительного ООБ качественный анализ ОП выполняется в ограниченном объеме.

Наиболее важным результатом качественного анализа ОП на стадии разработки предварительного ООБ является определение запасов времени оператора на выполнение послеаварийных действий (для ошибок типа С и В) и определение характера и моментов времени, когда появляется информация, помогающая принять решение о выполнении действия. Что касается ОП типа А, то качественный анализ сводится только к выявлению факторов, способствующих совершению той или иной ошибки исходя из имеющейся информации по анализу систем и эксплуатационной документации блоков-аналогов.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ

Несмотря на отсутствие большого объема информации, идентификация и качественный анализ ОП на стадии разработки предварительного ООБ в целом выполняется схожим образом с такими же анализами для действующих блоков (за исключением отличий, описанных в предыдущих разделах).

В части количественного анализа отличия выполнения данной задачи АНП на этапе разработки предварительного ООБ принципиальны от такого же анализа для действующих блоков. Это обуславливается следующими причинами:

- 1) Ограниченной информацией, необходимой для выполнения детального количественного анализа
- 2) Другими целями выполнения АНП на этапе разработки предварительного ООБ.

В таблицах 1 и 2 приведена информация, как об отличиях в целях АНП, так и о возможности получения необходимой информации для анализа, тем не менее, ниже приведена более подробная характеристика целей АНП на этапе разработки предварительного ООБ и их влияние на выполнение количественных анализов АНП.

Выполнение количественного анализа надежности персонала для действующих блоков ставит основной целью реалистичную, со смещением в сторону консерватизма, оценку вероятностей различных ошибок персонала. Имеющаяся информация, как правило, используется для подтверждения уровня безопасности блока, или его повышения, путем как внесения незначительных изменений в проекты систем, так и значительных изменений в инструкции по эксплуатации, техобслуживанию и ликвидации аварий.

Основными целями выполнения АНП на этапе разработки предварительного ООБ являются:

- 1) Оценка технически достижимого низкого значения вероятностей ошибок персонала, обеспечивающих:
 - а. Выполнение целевых вероятностных показателей безопасности блока

- b. Сбалансированного проекта, с тем, чтобы исключить ИС, вносящие непропорционально большой вклад в показатели безопасности блока (или блоков) АЭС.
- 2) Определение технических мер, обеспечивающих достижение требуемых значений вероятностей ОП. Такими мерами могут быть, например:
- a. схемные решения, позволяющие снизить вероятность ошибок типа А и В, включая устранение зависимостей между системами, потенциально приводящих к ИС.
 - b. изменение уставок и блокировок, обеспечивающих как увеличение запаса времени на выполнение послеаварийных действий, так и наличие своевременной информации для оператора на принятие решения по выполнению и само выполнение действия.
 - c. Введение автоматических блокировок, резервирующих действие оператора (при возможности и целесообразности).
- 3) Определение организационных мер, обеспечивающих достижение требуемых значений вероятностей ОП. Организационные меры, рассматриваемые на стадии разработки предварительного ООБ, могут включать
- a. требования на включение в инструкции по эксплуатации и техобслуживания регламента проверок, ремонта и обслуживания оборудования, позволяющего снизить ошибки типа А и В
 - b. требование на включение в аварийные инструкции специфической информации, позволяющей оператору принять правильное решение по выполнению того или иного послеаварийного действия
 - c. требование к организации блочного и резервного пунктов управления, а также организации работы смены блока, позволяющих снизить вероятность невыполнения действия за счет дополнительных сигналов, удобного человеко-машинного интерфейса, а также контроля выполнения необходимого действия независимыми друг от друга операторами блока, АЭС или группы технической поддержки.

Именно различие целей выполнения АНП на разных стадиях и определяет методику выполнения количественного анализа АНП и выбор моделей АНП на стадии предварительного ООБ, позволяющих наиболее практично оценить, как базовые значения вероятностей ОП, так и изменения этих вероятностей при реализации указанных выше организационных и технических мер. Ниже приведены основные подходы, используемые для количественной оценки ОП для трех типов ОП.

Важно отметить, что количественный анализ на стадии разработки предварительного ООБ выполняется итерационно и совместно с другими задачами АНП. То есть эта задача не самостоятельная, и ее завершение невозможно без выполнения следующих работ, представленных на рис. 1.



Рис.1 Этапы количественного анализа

Количественный анализ ошибок оператора типа А

Как уже указывалось выше, анализ выполняется в несколько итераций:

1. После того как идентифицированы и сгруппированы все возможные ошибки типа А на первом шаге количественного анализа им могут назначаться скрининговые (отборочные) значения. Такая практика допустима, так как, как правило, ОП типа А не вносят существенного вклада в риск и для ряда ОП скрининговые значения могут оставаться в модели ВАБ без их уточнения. Более важным является назначение условных вероятностей зависимых ОП типа А, приводящих в отказу нескольких каналов систем безопасности. Важно отметить, что ошибки типа А наиболее важны именно в системах безопасности, так как они проявляются только при приходе требования на работу системы или при испытаниях.

При выполнении скрининга условная вероятность как правило назначается достаточно высокой (например, 0,1 для ОП в двух каналах и 0,05 для ОП в трех и более каналах).

2. После выявления значимых ОП типа А для этих ОП выполняется анализ условий и причин их возникновения, а также возможности снижения условной вероятности зависимых ОП. В совместных дискуссиях с проектировщиками систем определяются необходимые и возможные технические и организационные меры по снижению как вероятностей самих ОП, так и условных вероятностей зависимых ОП.
3. Выполняется уточненный анализ для значимых ОП, в предположении реализации всех проектных и организационных мер. Оцененные в ходе уточненного анализа вероятности ОП типа А вносятся в интегральную модель ВАБ. Уточненный анализ выполняется с использованием тех же методов, которые применяются при выполнении ВАБ действующих блоков. При выборе метода АНП учитывается объем доступной для анализа информации.
4. Оценивается вклад ОП типа А в рассчитанный вероятностный показатель безопасности и оценивается необходимость дополнительных мер по снижению вероятностей ОП типа А. Как правило, дополнительные меры не требуются, если вклад ОП типа А составляет менее 1% от целевого вероятностного показателя безопасности, а фактор снижения риска менее 1,1. Если указанные значения превышены, возможен переход к п. 2. Однако на практике более эффективно после первой итерации перейти к следующим типам ошибок персонала и

вернуться к п. 2 после определения включения в интегральную модель ОП других типов.

5. После завершения анализа АНП все определенные в ходе анализа меры документируются в отчете по АНП и на стадии окончательного ООБ при выполнении ВАБ уточняется каким образом в проектах систем и в инструкциях по эксплуатации и техобслуживанию систем реализованы предполагаемые в анализе меры.

Количественный анализ ошибок оператора типа В

Процедура выполнения количественного анализа ОП типа В по сути не отличается от приведенной выше для ОП типа А. Некоторое отличие шагов анализа может быть для ошибок, связанных с принятием ошибочного решения по отключению работающих систем нормальной эксплуатации или инициализации систем безопасности или систем важных для безопасности, находящихся в режиме ожидания (как правило в ВАБ не рассматриваются осознанные вредоносные действия).

Принципиально схема анализа не отличается, но при анализе таких ОП не рассматриваются зависимости между ОП типа В. Вместо них могут анализироваться зависимости между ОП типа В и ОП типа С, связанные с действиями, направленными на устранение последствий ИС, вызванных ОП типа В.

Количественный анализ ошибок оператора типа С

Наибольшее отличие подходов к количественному анализу ОП на стадии разработки предварительного ООБ и для действующих блоков обнаруживается именно для ОП типа С.

На стадии разработки предварительного ООБ, как правило, имеется достаточно ограниченная информация о процессах после возникновения исходного события, полученная в рамках детерминистических анализов безопасности для проектных и ряда запроектных аварий. Как правило, этой информации достаточно для построения предварительных моделей аварийных последовательностей и определения основных действий оператора, необходимых для перевода блока в стабильное безопасное состояние. Однако на первом этапе анализа АНП имеется ограниченная информация, необходимая для детального анализа ОП типа С, например:

- информация об уставках и блокировках на срабатывание систем неполна;
- сигналы, информирующие оператора о необходимости выполнения действия, не полностью определены;

- теплогидравлические расчеты, обосновывающие запас времени оператора на выполнение действия (то есть разницу между моментом времени, когда оператор получает информацию, позволяющую принять решение о необходимости выполнения действия, и моментом времени, когда выполнение действия не может изменить негативное развитие ситуации), недостаточны для охвата всех действий оператора;

- имеется неполная информация о том, какое время и какие шаги необходимы оператору для выполнения конкретного действия;

- отсутствует информация о том, кто и каким образом может обнаружить ошибку оператора как по принятию решения о выполнении, так и при выполнении самого действия;

- отсутствует информация о том, в какой мере конкретная ситуация, требующая выполнения конкретного действия, отражена в аварийных инструкциях и каким образом организован процесс тренировки оператора по выполнению этого действия в заданных условиях.

Даже принятие консервативных скрининговых значений ОП в такой ситуации не приведет к разумному результату, так как формально в приведенных выше условиях скрининговые значения должны быть близки к 1. Поэтому даже для первого шага анализа принимаются допущения, позволяющие выполнить количественные оценки вероятностей более реалистично.

Например, могут приниматься следующие допущения, компенсирующие приведенные выше ограничения:

- постулируется перечень уставов и блокировок на срабатывание систем на основании информации по блокам-аналогам, эскизных проектных проработок и консультаций с инженерами-проектировщиками;
- определяются сигналы, наличие которых позволит оператору понять, что выполнение конкретного действия действительно необходимо;
- запас времени оператора на выполнение действия определяется исходя из имеющихся анализов, в максимально консервативных предположениях;
- необходимые шаги оператора для выполнения конкретного действия определяются исходя из опыта выполнения таких действий на работающих блоках, которые могут быть использованы для рассматриваемого действия;
- исходя из имеющейся информации о составе смены блочного пункта управления (БПУ) определяется, кто и каким образом может обнаружить ошибку оператора по принятию решения о выполнении или при выполнении самого действия;

- предполагается, что в аварийных инструкциях отражена вся необходимая информация для выполнения действия и организован процесс тренировки оператора по выполнению этого действия в заданных условиях.

Количественная оценка вероятностей ОП выполняется для всех выявленных действий с использованием методов анализа, обеспечивающих реалистичные оценки и способных использовать всю приведенную выше информацию.

Полученные оценки используются как скрининговые значения для включения в интегральную модель ВАБ и выявления доминантных ОП типа С.

После выявления доминантных ОП типа С выполняются шаги, во многом аналогичные приведенным для ОП типа А:

1. Выполняется анализ условий и причин возникновения доминантных ОП, в частности, определяются наиболее важные факторы, влияющие на поведение персонала в рассматриваемых аварийных сценариях. Как правило, такими факторами являются те же факторы, что и рассматриваемые при выполнении АНП для ОП типа С действующих блоков:
 - a. Запас времени на принятие решения и выполнение действия
 - b. Качество человеко-машинного интерфейса (ЧМИ)
 - c. Сложность принятия решения
 - d. Сложность выполнения действия
 - e. Уровень подготовки оператора к выполнению рассматриваемого действия в рассматриваемых условиях и т.п.
2. Определяются возможные меры по снижению негативного влияния этих выявленных факторов. Примеры технических и организационных мер для некоторых факторов приведены в Таблице 3 ниже.

Таблица 3 Меры для снижения негативного влияния факторов, влияющих на поведение оператора

Факторы, влияющие на поведение	Возможные организационные и технические меры	Примечания
Запас времени на принятие решения и выполнение действия	Изменение уставок и блокировок, обеспечивающих	Изменение уставок и блокировок приводит к необходимости выполнения дополнительных

Факторы, влияющие на поведение	Возможные организационные и технические меры	Примечания
	увеличение запаса времени для оператора	теплогидравлических расчетов и может приводить к изменению моделей аварийных последовательностей. Это, в свою очередь, может приводить к выявлению дополнительных ОП типа С, которые также включаются в анализ.
Качество ЧМИ	Введение дополнительных сигналов (звуковых, световых). Организация смены БПУ таким образом, чтобы усилить независимый контроль другими членами смены. Выявление признаков, позволяющих идентифицировать необходимость выполнения действия персоналом блока, не входящим в смену БПУ.	Примером таких признаков может являться высокий уровень радиации, выявляемый персоналом радиационного контроля, который выполняет независимый контроль всех радиационно-опасных операций и может выявить необходимость выполнения послеаварийного действия, по наличию повышенного уровня радиации.
Сложность принятия решения	Включение в аварийные инструкции четкого требования по выполнению действия в условиях	-

Факторы, влияющие на поведение	Возможные организационные и технические меры	Примечания
	рассматриваемого сценария	
Сложность выполнения действия	Оптимизация рабочего места операторов БПУ и локальных мест управления	Примером такой оптимизации может являться использование ключей управления, расположенных в доступном месте, с четкой идентификацией функции каждого ключа. При этом должно быть обеспечено исключение ошибок по ложному выбору ключа управления.
Уровень подготовки оператора к выполнению рассматриваемого действия в рассматриваемых условиях	Включение в программы тренировок анализируемого действия в условиях рассматриваемого сценария	-

3. Выполняется уточненный анализ для значимых ОП в предположении реализации всех проектных и организационных мер. Оцененные в ходе уточненного анализа вероятности ОП типа С вносятся в интегральную модель ВАБ. Уточненный анализ выполняется с использованием тех же методов, что и применяются при выполнении ВАБ действующих блоков. При выборе метода АНП учитывается объем доступной для анализа информации.
4. Оценивается вклад ОП типа С в рассчитанный вероятностный показатель безопасности и оценивается необходимость дополнительных мер по снижению вероятностей ОП типа С. Как правило, дополнительные меры не требуются, если вклад ОП типа С составляет менее 1% от целевого вероятностного показателя безопасности, а фактор снижения риска менее 1,1. Если указанные значения

превышены, возможен переход к п. 1. Однако на практике более эффективно после первой итерации рассмотреть дополнительные технические решения, позволяющие снизить зависимость результатов ВАБ от вероятности рассматриваемой ОП типа С, а именно, внесение изменений в проект блока, обеспечивающих автоматическое выполнение функции, ранее выполняемой оператором.

5. После завершения анализа АНП все определенные в ходе анализа меры документируются в отчете по АНП, и при выполнении ВАБ на стадии разработки окончательного ООБ уточняется, каким образом в проектах систем, организации БПУ, в противоаварийных инструкциях, в программах тренировки и т.п. реализованы предложенные в ходе анализа меры.

ИНТЕГРАЦИЯ В МОДЕЛЬ ВАБ

Интеграция ОП всех типов в модель ВАБ выполняется теми же методами и с использованием тех же подходов, что и при разработке ВАБ для действующих блоков.

Единственное важное отличие заключается в том, что процесс интеграции выполняется многократно и, следовательно, должны выбираться методы включения ОП в модель ВАБ, максимально поддерживающие возможность обновления как данных по вероятности ОП, зависимостей между ОП, так и номенклатуру ОП.

Анализ зависимостей между ОП и минимальное значение результирующей ОП

Результаты ВАБ независимо от этапа жизненного цикла АЭС не так зависят от номинальных значений ОП любых типов, как от того, каким образом оценены зависимости между ОП, входящих в одно минимальное сечение.

Любая оптимизация на блоке, обеспечивающая снижение вероятностей конкретных ОП, не обеспечит существенного снижения вероятностных показателей безопасности блока, если:

- существуют значимые минимальные сечения, включающие более одной ОП;
- степень зависимости между ОП, входящими в минимальное сечение высока.

Поэтому важнейшими задачами АНП на этапе разработки предварительного ООБ являются:

- 1) выявление минимальных сечений, включающих более одной ОП;
- 2) анализ степени зависимости между ОП, входящими в одно минимальное сечение;
- 3) определение мер по снижению степени зависимостей.

Эти задачи выполняются в ходе всего итерационного процесса АНП при выполнении ВАБ на этапе разработки предварительно ООБ и в конечном счете включаются в интегральную модель ВАБ, используемую для подтверждения целевых вероятностных показателей безопасности АЭС.

Сам по себе процесс анализа зависимостей на этапе разработки предварительного ООБ не отличается от анализа, выполняемого для действующих блоков, однако также имеет определенную специфику из-за различия целей АНП. Общая цель АНП на стадии разработки предварительного ООБ, в первую очередь, заключается в оптимизации блока путем идентификации и реализации в проекте организационных и технических мер, позволяющих, в конечном счете, обеспечить требуемый уровень безопасности блока, поэтому целью анализа зависимостей, в первую очередь, является выявление факторов, влияющих на степень зависимостей между ОП, и идентификация технических и организационных мер, позволяющих ее существенно снизить. В таблице 4 приведены наиболее значимые факторы, как правило, определяющие степень зависимостей между ОП и примеры мер, которые могут быть реализованы для ее снижения. Для упрощения, не влияющего на общий подход, рассматривается ситуация, когда в минимальное сечение входит только две ОП.

Таблица 4 Факторы, определяющие степень зависимостей между ОП

Факторы, влияющие на степень зависимости	Возможные организационные и технические меры	Примечания
Зависимость по когнитивной составляющей действий оператора	-	Когнитивная составляющая действий определяется целью выполнения действий и не может быть снижена организационными и техническими мерами. При отсутствии когнитивной зависимости можно утверждать, что ОП, связанные с соответствующими

Факторы, влияющие на степень зависимости	Возможные организационные и технические меры	Примечания
		действиями оператора независимы
Время между действиями, относящимися к ОП в одном минимальном сечении	Изменение уставок и блокировок, обеспечивающих увеличение запаса времени для оператора на выполнение последующих действий при отказе первого из представленных в минимальном сечении	Эта мера приводит также к повышению надежности выполнения первого действия в цепочке резервирующих действий оператора. Какое действие в цепочке действий можно определять как первое, является исключительно важным и обсуждается после таблицы
Общность персонала, принимающего решение по выполнению действий	Организация смены БПУ таким образом, чтобы усилить независимый контроль другими членами смены. Выявление признаков, позволяющих идентифицировать ОП персоналом блока, не входящего в смену БПУ	Меры почти идентичны предлагаемым для повышения надежности выполнения единичного действия, но также эффективны для снижения степени зависимости. Если персонал, независимый от персонала смены БПУ, имеет возможность идентифицировать совершенную ОП по признакам, отличным от тех, на которые опирается персонал БПУ, то независимость восстанавливающего

Факторы, влияющие на степень зависимости	Возможные организационные и технические меры	Примечания
		действия по устранению последствий ОП повышается
Нагрузка на оператора при выполнении действий	Оптимизация рабочего места операторов БПУ и локальных мест управления. Тренировка оператора по практическому выполнению всех действий индивидуально, так и в цепочке действий	Примером такой оптимизации может являться использование ключей управления, расположенных в доступном месте, с четкой идентификацией функции каждого ключа

Как видно из таблицы 4, меры, предназначенные для снижения уровня зависимостей, схожи с мерами, предназначенными для повышения надежности выполнения индивидуальных действий. Особенностью анализа зависимостей на этапе разработки предварительного ООБ является сама возможность идентификации и реализации в проекте тех мер, которые обеспечат совокупную их эффективность в плане снижения вклада ОП в риск эксплуатации АЭС.

Необходимо отметить несколько важных черт анализа зависимостей, особенно важных при выполнении анализа зависимостей на этапе разработки предварительного ООБ. Эти черты присутствуют и в АНП для действующих блоков, но их учет наиболее полезен при выполнении АНП на этапе разработки предварительного ООБ.

1. Учет зависимостей между различными типами ООП

В ВАБ для действующих блоков ОП типа А и типа В, как правило, считаются независимыми от ОП других типов (для ОП типа В, в частности, из-за упрощенного их моделирования путем учета в частоте ИС). Однако, при выполнении АНП для этапа предварительного ООБ, как правило, ОП типа В анализируются на наличие и степень их зависимости с ОП типа С, совершаемыми при выполнении действия по устранению последствий ОП типа В. Степень таких зависимостей может быть высока, когда один и тот же персонал может привести к возникновению ИС и участвует в ликвидации его последствий.

Наиболее ярко такие зависимости проявляются при выполнении операций в режимах остановленного блока. Пример таких зависимостей рассмотрен ниже.

При дренировании реактора оператор может по какой-либо причине совершить ошибку по снижению уровня ниже допустимого, и он же по той же причине может совершить ошибку по предотвращению снижения уровня ниже критичного (например, нижнего патрубка реактора). Такая зависимость может считаться высокой и, в принципе, наиболее разумной технической мерой является введение сигнала на автоматическое отсечение линии дренирования по снижению уровня ниже допустимого. Тем не менее, даже для рассмотренной ситуации возможны компенсирующие технические и организационные меры, позволяющие снизить общую вероятность ОП по пере-дренированию реактора:

- 1) Введение дополнительных сигналов после снижения уровня ниже допустимого, позволяющих оператору заметить совершенную ошибку
- 2) Включение в процесс дренирования других операторов смены, контролирующих оператора, выполняющего процесс дренирования
- 3) Использование информации от операторов, контролирующих заполнение емкостей, в которые сливается вода из реактора
- 4) Определение технических мер и включение их в аварийные инструкции по дозаполнению реактора в случае передренирования, но не доходя до достижения критичного уровня (например, верха активной зоны).

Именно на этапе разработки предварительного ООБ анализ и учет в АНП зависимостей и позволяет разработать оптимальную стратегию и техническую реализацию защиты от зависимых ОП типа В и С.

2. Выбор первого действия в цепочке действий при анализе зависимостей

Как правило, при выполнении анализа зависимостей между ОП в ВАБ действующего блока за первое действие в цепочке резервирующих действий принимается то действие, которое полагается делать оператору согласно аварийным инструкциям. Очевидно, если факторы, влияющие на выполнения этого действия, негативны, то и оценка его вероятности будет достаточно высока. Если резервирующие действия имеют зависимость от первого действия, то общая оценка зависимого ОП также будет иметь высокую вероятность, так как в первую очередь она определяется вероятностью первого действия. Такая ситуация не применима к АНП на этапе разработки предварительного ООБ, так как противоречит цели такого анализа – повышения безопасности блока.

При выполнении АНП на этапе разработки предварительного ООБ, как правило, первым в цепочке действий назначается действие, имеющее наименьшую вероятность

ошибки при его совершении, если приоритетное выполнение именно этого действия может быть включено в противоаварийные инструкции и в программы тренировки персонала.

Если это невозможно, то используется подход, принятый в ВАБ действующих блоков, кратко описанный выше.

3. Ограничение на минимальное значение совместной ОП в цепочке резервируемых действий

Как указывается в [3] в практике выполнения АНП для действующих блоков принято правило, что общая вероятность с учетом зависимостей ОП в цепочке действий, входящих в одно минимальное сечение, не может быть ниже $1.0E-5$.

Практически, это равносильно утверждению, что не существует мер, как технических, так и организационных, позволяющих предотвратить повреждение топлива с вероятностью менее $1.0E-5$ только за счет действий оператора.

Такой подход принципиально недопустим в АНП для проектируемых блоков, так как приводит к глобальному противоречию между АНП и целями проектирования, где АНП является сдерживающим прогресс фактором:

- 1) На практике количество сигналов, которые способствуют идентификации и восстановлению ОП имеет тенденцию к увеличению
- 2) В методологии АНП даже множественное восстановление не позволяет получить общую вероятность ОП ниже $1.0E-5$.

При выполнении АНП на этапе разработки предварительного ООБ анализ зависимостей выполняется с использованием известных методологий, и допущение об ограничении минимального значения снимается. Именно такой подход позволяет оптимизировать процесс управления блоком, снизить степень зависимостей между ошибками оператора в цепочке действий, оценить и снизить реальный вклад ОП в вероятностные показатели блока.

При выполнении АНП на этапе разработки предварительного ООБ следует гарантировать, что вся информация, доступная для оператора, верна и не приводит к ошибке, вызванной ситуацией. Поэтому использование ограничений по совместному ОП слишком консервативно и бесполезно. Конкретные ситуации, когда дополнительные

отказы оборудования могут привести к ошибке из-за неверной информации, как, например, при аварии на АЭС «Три Майл Айленд», должны быть непосредственно включены в ВАБ².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье показано, что АНП, выполняемый для действующих блоков, значительно отличается от АНП, выполняемых для проектируемых блоков, особенно для блоков нового поколения, не имеющих явных аналогов. Это связано с анализом всех типов ошибок персонала, включая зависимые ошибки. Эти отличия в первую очередь вызваны целями выполнения АНП, но также и условиями его выполнения (например, отсутствие необходимой информации для детального анализа). Такой анализ является мощным инструментом для оптимизации проекта АЭС, который легко сделать на этой стадии жизненного цикла АЭС с целью повышения безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No.SSG-3, Vienna, 2010.
2. Lankin M.Yu., Lyubarskiy A.V., Kuzmina I.B., Tokmachev G.V. "The application of the fail-safe design principle taking into account information about the risk (following the lessons of the lessons of the accident at the nuclear power plant "Fukushima Daiichi")/ Nuclear and Radiation Safety, 2015, No. 4 (78), pp. 3-18.
3. SWISRUS PROJECT, Novovoronezh Unit 5 PSA. Part I: PSA Level-1 for Internal Initiating events, Main Report, Moscow, December 1999

² Следует отметить, что возможно возражение приведенным выше соображениям, а именно: «Утверждение о том, что увеличение проверок увеличивает вероятность обнаружения/восстановления ошибок противоречиво. Из примеров опыта эксплуатации видно, что несмотря на проверки (в основном, несколько проверок) могут быть обнаружены ошибки.» Это утверждение не совсем корректно, поскольку все известные множественные человеческие ошибки в последовательности резервируемых действий имеют одни и те же признаки: либо высокий, либо умеренный уровень зависимости между действиями или жесткую комбинацию факторов, влияющих на поведение, что приводит к увеличению вероятности ОП. Наилучшим примером является множественные человеческие ошибки при аварии на АЭС «Три Майл Айленд», где ошибка предотвращения низкого уровня в реакторе в основном была вызвана человеческой ошибкой, связанной с прекращением впрыска, на основании совершенно неправильной информации об уровне в реакторе. С точки зрения информации и тогдашнего уровня знаний о развитии аварии операторы вели себя абсолютно правильно.