

Культура безопасности: инженерия человеческих факторов

Машин Владимир Анатольевич - Старший научный сотрудник Обнинского научно-исследовательского центра «Прогноз». Кандидат психологических наук.

E-mail: mashin-va@mail.ru

На примере конкретных инцидентов на АЭС рассмотрена важная роль систематического учёта человеческих факторов в процессе разработки и реализации проектов интерфейсов "человек-система", процедур и программ обучения персонала для предупреждения неправильных действий человека, обусловленных проблемами эргономики. Представлена программа инженерии человеческих факторов (рекомендованная Комиссией по ядерному регулированию США), интегрированная в процессы проектирования и модификации (реконструкции, модернизации) конструкций, систем и компонентов АЭС, а также процедур и программ обучения. Внедрение программы инженерии человеческих факторов и следование требованиям и принципам в области эргономики, сформулированным МАГАТЭ, направлено на формирование сильной культуры безопасности и достижение высоких и устойчивых показателей безопасности и надёжности деятельности персонала АЭС. Представленный материал будет полезен при решении задач создания и поддержания сильной культуры безопасности в области инженерии человеческих факторов как на АЭС, так и на других типах электростанций.

Ключевые слова: культура безопасности, программа инженерии человеческих факторов, эргономика, инциденты на АЭС, неправильные действия человека, причинные факторы.

Один из важных выводов расследований аварий на АЭС Три-Майл-Айленд [1, 2] и Чернобыльская АЭС [3] состоял в том, что ошибки, обусловленные недостатками учёта человеческих факторов в процессе проектирования, играют важную роль в возникновении и развитии инцидентов и аварий на атомных электростанциях [4].

В 1984 году Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) опубликовало руководство 50-SG-D8 по системам контроля и управления для АЭС, связанным с безопасностью [5]. В нём отдельно были рассмотрены человеческие факторы, которые должны приниматься во внимание при проектировании блочных щитов управления (БЩУ). К ним были отнесены рабочая нагрузка, условия труда, возможность человеческой ошибки, время реакции оператора и минимизация его физических и умственных усилий для облегчения выполнения процедур в штатных и аварийных режимах. С учётом человеческих факторов был сформулирован ряд целей проектирования БЩУ в области средств отображения информации (СОИ) и органов управления.

В 1988 году МАГАТЭ подготовило новую редакцию свода положений по безопасности АЭС 50-S-D в области проектирования [6], включив дополнительно систематический учёт человеческих факторов в процесс разработки конструкций, систем, компонентов и процедур, важных для безопасности атомных станций. Было подчёркнуто, что рабочие

места и условия выполнения работ должны быть спроектированы в соответствии с принципами эргономики, чтобы обеспечивать оптимальную деятельность операторов.

В 2000 году МАГАТЭ выпустило требования безопасности NS-R-1 в области проектирования АЭС [7], чётко акцентировав внимание на важности учёта человеческих факторов при разработке и реализации проектов конструкций, систем и компонентов АЭС, а также процедур, важных для безопасности атомных станций. Данные требования были конкретизированы в публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ SSR-2/1, посвящённой вопросам безопасности при проектировании АЭС и опубликованной в 2012 году [8]. Перечисленные требования охватывают не только проектирование конструкций, систем, компонентов и процедур АЭС, а также и организационные процессы, важные для безопасной и надёжной эксплуатации АЭС на всех стадиях её жизненного цикла.

Отдельным требованием в SSR-2/1 выделены принципы учёта человеческих факторов (аспектов эргономики) для обеспечения оптимальной работы операторов [8]:

1. При проектировании должно быть обосновано и чётко указано минимальное количество эксплуатационного персонала, требующееся для выполнения всех одновременных операций, необходимых для обеспечения безопасного состояния станции.

2. Эксплуатационный персонал, имеющий опыт работы, должен, насколько это представляется практически возможным, активно привлекаться к процессу проектирования с тем, чтобы в рамках этого процесса на самых ранних стадиях уделять внимание вопросам эксплуатации и технического обслуживания оборудования в будущем.

3. Проектирование должно способствовать выполнению эксплуатационным персоналом его обязанностей и задач и ограничивать вероятность возникновения ошибок и их влияние во время эксплуатации на безопасность (внимание к планировке систем, компоновке оборудования и содержанию процедур с целью облегчения взаимодействия человек-машина во всех эксплуатационных режимах).

4. Взаимодействие человек-машина должно проектироваться с таким расчётом, чтобы операторы получали всеобъемлющую, но легко поддающуюся управлению информацию, с учётом времени, необходимого для принятия решений и соответствующих действий. Информация, необходимая оператору для принятия решения о действиях, должна быть представлена в ясной и недвусмысленной форме.

5. Оператор должен получать информацию, необходимую для:

- a) оценки общего состояния станции в любых условиях;
- b) эксплуатации станции в установленных пределах для параметров, связанных с системами и оборудованием станции (эксплуатационные пределы и условия);

- с) подтверждения автоматического инициирования срабатывания систем безопасности, когда это необходимо, и штатной работы соответствующих систем;
- д) определения как необходимости ручного инициирования указанных действий по обеспечению безопасности, так и времени такого инициирования.

6. Проект должен быть разработан с таким расчётом, чтобы способствовать успеху действий оператора с надлежащим учётом времени, имеющегося для принятия мер, ожидаемых условий и психической нагрузки на оператора.

7. Необходимость быстрого вмешательства оператора должна быть сведена к минимуму, и должно быть продемонстрировано, что оператор располагает достаточным временем для принятия решения о действиях и для осуществления действий.

8. Рабочие места и условия работы эксплуатационного персонала должны проектироваться в соответствии с концепциями эргономики.

9. В процессе проектирования должна проводиться верификация и валидация аспектов принципов эргономики для взаимодействия человек-машина, в том числе с использованием тренажёров с целью подтвердить, что необходимые действия оператора определены и могут быть правильно выполнены.

Одним из требований к проектированию АЭС было определено применение концепции глубокошелонированной защиты ко всем видам деятельности, связанным с обеспечением безопасности, включая организационные, поведенческие или проектные [8, 9]. Данная концепция опирается на несколько уровней защит на пути выхода радиоактивных материалов в окружающую среду и разнообразные программы, призванные предупредить возникновение неправильных действий человека, а если они были допущены, вовремя устранить или минимизировать их последствия [10]. Эти программы включают в себя проектирование и модификацию конструкций, систем и компонентов АЭС, а также процедур и программ обучения персонала [8, 11] на основе эргономики или инженерии человеческих факторов (Human Factors Engineering, HFE) - инженерной дисциплины, учитывающей факторы, влияющие на безопасность эксплуатации проектируемых объектов, а также на эффективность и надёжность деятельности человека [12].

Программа HFE должна быть интегрирована в процессы проектирования и оценки надёжности и безопасности АЭС [4]. Продукты, разработанные с привлечением программы HFE (например, интерфейсы "человек-система", эксплуатационные и аварийные процедуры, программы обучения), способствуют безопасному, эффективному и надёжному выполнению задач эксплуатации, технического обслуживания, испытаний,

инспекций и надзора за оборудованием и системами АЭС [4]. Под интерфейсами "человек-система" понимается совокупность средств, методов и правил взаимодействия человека с организацией, работой, оборудованием, системами, программным обеспечением, документацией и средой [13].



Рисунок 1. Процессная модель программы инженерии человеческих факторов (HFE).

В 1994 году Комиссия по ядерному регулированию США (NRC) опубликовала отчёт NUREG-0711, в котором представила модель анализа программы HFE [14]. Накопленный опыт в области HFE и применения данной модели позволил постепенно уточнить структуру программы HFE. В 2012 году NRC представила третью редакцию NUREG-0711 [4], в которой модель анализа программы HFE включает оценку 12 элементов или видов деятельности (рис. 1), вовлечённых в четыре основных стадии проектирования: планирование и анализ, разработка и проектирование, верификация и валидация, внедрение и реализация [4].

I. Планирование и анализ

1. Управление программой HFE опирается на группу разработчиков в области эргономики, наделённую ответственностью и полномочиями. Организационная структура группы нацелена на обеспечение соответствия всех аспектов проектирования и эксплуатации АЭС обязательствам в области эргономики. Группа руководствуется планом, гарантирующим, что программа HFE должным образом разработана, надлежащим образом выполняется, контролируется и документируется. План программы описывает элементы HFE, гарантирующие, что принципы эргономики применяются при анализе, разработке и оценке интерфейсов "человек-система", процедур и программ обучения [15].

2. Анализ опыта эксплуатации служит выявлению проблем безопасности, связанных с эргономикой. Рассмотрение опыта эксплуатации предоставляет информацию о недостатках и проблемах в работе действующих аналогичных АЭС. Проблемы и уроки, извлечённые АЭС из внутреннего и внешнего опыта эксплуатации, обеспечивают ей основу для улучшения всех аспектов проектирования и эксплуатации станции.

3. Функциональный анализ и распределение функций определяют функции, которые должны выполняться для достижения общих целей и задач в области безопасности и эксплуатации АЭС, а также распределяют ответственности за эти функции между персоналом и автоматикой таким образом, чтобы в полной мере использовать возможности человека, избегая его ограничений. Распределение функций служит повышению безопасности и надёжности АЭС и основывается на функциональных требованиях и принципах эргономики в рамках структурированной, хорошо документированной методологии, которая чётко определяет должностные обязанности персонала.

4. Анализ рабочих заданий служит определению конкретных задач и действий, необходимых для выполнения функций, возложенных на персонал АЭС, а также сигналов тревоги, СОИ, органов управления и вспомогательных средств для достижения целей

заданий. По результатам анализа заданий получают важную информацию для последующих элементов программы HFE: анализ нормативной численности и квалификации персонала; разработка интерфейсов "человек-система", процедур и учебных программ; определение критериев верификации средств поддержки персонала при выполнении заданий.

5. Анализ нормативной численности и квалификации персонала является важным фактором всех аспектов проектирования и эксплуатации АЭС. Штатная численность устанавливается на основе функционального анализа и распределения функций между персоналом и системами автоматики, анализа рабочих заданий для выполнения персоналом возложенных на него функций, а также накопленного опыта работы других АЭС и требований надзорного органа.

6. Анализ важных действий человека служит определению действий, которые наиболее важны для безопасности и эксплуатации АЭС, а также для понимания механизмов ошибок человека при их выполнении, с целью применения принципов эргономики на всех стадиях проектирования и эксплуатации АЭС. Это позволяет установить приоритеты и направить имеющиеся усилия и ресурсы именно на те виды деятельности, которые наиболее эффективно обеспечивают достижение общих целей и задач в области безопасности и эксплуатации АЭС. Основная цель анализа важных действий состоит в минимизировании вероятности ошибок человека и в создании условий, гарантирующих, что персонал может своевременно обнаруживать и устранять любые ошибки, которые возникают в процессе их деятельности.

II. Разработка и проектирование

7. Проектирование интерфейсов "человек-система" служит для перевода функциональных требований и требований к выполнению заданий в требования эргономики к разработке интерфейсов "человек-система", а также к детальному проектированию сигналов тревоги, СОИ, органов управления и других аспектов взаимодействия человека с системами и оборудованием. Специалисты используют структурированную методологию для проектирования, испытаний и оценок интерфейсов "человек-система" на основе руководящих принципов эргономики в этой области.

8. Разработка процедур имеет важное значение для безопасности и эксплуатации АЭС, поскольку они поддерживают и направляют взаимодействие персонала с системами станции и реагирование персонала на события, связанные с работой АЭС. Разработка процедур включает принципы и критерии эргономики, которые определяют требования к их форме и содержанию, обеспечивая создание процедур, которые являются технически точными, всеобъемлющими, простыми и валидными в использовании.

9. Разработка программ обучения имеет большое значение для обеспечения безопасной и надёжной работы АЭС. Программы обучения помогают обеспечить разумную гарантию того, что персонал АЭС обладает знаниями, умениями и способностями, необходимыми для выполнения своих должностных обязанностей. Для разработки программ обучения специалисты используют системный подход на основе функционального анализа и распределения функций между персоналом и системами автоматики, а также на основе анализа рабочих заданий, возложенных на персонал для выполнения своих функций.

III. Верификация и валидация

10. Верификация и валидация аспектов HFE служит определению соответствия интерфейсов "человек-система, процедур и программ обучения принятым принципам разработки и проектирования в области эргономики, позволяющим персоналу успешно и безопасно выполнять свои рабочие задания для достижения общих целей безопасности и эксплуатации АЭС.

Верификация средств поддержки выполнения задач интерфейсов "человек-система" проводится с целью убедиться, что они предоставляют персоналу в полном объёме сигналы тревоги, информацию, органы управления, а также обеспечивают необходимую поддержку, согласно анализу рабочих заданий, для выполнения персоналом своих функций в соответствии с руководящими принципами эргономики. Верификация процедур или программ обучения проверяет, как они соответствуют руководящим принципам эргономики.

Валидация интегрированной системы проводится с целью подтвердить, используя испытания в реальных или близких к реальным условиям, что проект интегрированной системы (аппаратное и программное обеспечение, процедуры и обученный персонал) поддерживает безопасную и надёжную эксплуатацию АЭС.

IV. Внедрение и реализация

11. Внедрение проекта рассматривает вопросы отслеживания внедрения разработанной конструкции, системы или компонента АЭС (включая процедуры и программы обучения) на основе чётко определённых и тщательно контролируемых процедур пуска и испытаний, обеспечивая соответствие верифицированному и валидированному проекту, разработанному на основе руководящих принципов эргономики к проектированию.

12. Мониторинг показателей деятельности человека обеспечивает постоянный контроль показателей деятельности человека для проверки достоверности выводов по валидации интегрированных систем "человек-система" в ходе эксплуатации и отсутствия

существенного снижения безопасности АЭС вследствие каких-либо изменений, внесённых в конструкции, системы, компоненты АЭС, процедуры или программы обучения персонала АЭС.

В 2019 году МАГАТЭ подготовило конкретное руководство по безопасности SSG-51 [16], содержащее структурированный подход и рекомендации по применению HFE в ходе проектирования и модификации человеко-машинных интерфейсов конструкций, систем и компонентов АЭС, с целью минимизации риска человеческих ошибок и оптимизации деятельности операторов для обеспечения безопасной эксплуатации АЭС.

В руководстве SSG-51 представлены рекомендации и руководящие указания для следующих видов деятельности программы HFE: управление программой [17]; анализ опыта эксплуатации [18, 19]; функциональный анализ и распределение функций (ГОСТ Р МЭК 61839); анализ задач; анализ численности и квалификации персонала; анализ важных для безопасности задач и действий персонала; проектирование органов управления, СОИ, рабочих мест операторов и окружающей среды, БЩУ и резервных пунктов управления, систем сигнализации, процедур, программ обучения (ГОСТ Р ИСО 11064; ГОСТ Р МЭК 60964, 60965, 61227, 61513, 61772, 62241); планирование, методы, критерии, сбор и анализ данных для верификации и валидации проекта HFE (ГОСТ Р МЭК 61771); внедрение проекта HFE; обеспечение реализации проекта HFE (мониторинг показателей деятельности человека). Отдельно рассмотрены вопросы интеграции программы HFE в процессы безопасности (разработка отчёта по анализу безопасности АЭС, модификации конструкций, систем и компонентов АЭС, периодическое рассмотрение безопасности АЭС) [18, 20, 21, 22], её применения при проектировании компьютеризованных процедур (ГОСТ Р МЭК 62646), при осуществлении закупочной деятельности.

В руководстве SSG-51 подчеркнута, что программа HFE должна учитывать динамическое взаимодействие следующих факторов в ходе эксплуатации и технического обслуживания АЭС:

- Человеческие факторы (например, знания и опыт персонала, его мотивация, рабочая нагрузка и стресс, требуемые физические усилия, размеры тела);
- Технические факторы (например, технологические процессы, органы управления и СОИ, системы сигнализации, программное обеспечение, аппаратные средства, инструменты, оборудование);
- Организационные факторы (например, система управления, структура организации, функции и обязанности руководителей всех уровней станции, ресурсы, укомплектованность кадрами).

Рассмотрим далее на конкретных примерах, как недостатки программы HFE или учёта факторов эргономики в процессе проектирования и реализации интерфейсов "человек-система" ("человек-машина") способствовали возникновению инцидентов, вызванных неправильными действиями эксплуатационного персонала АЭС.

Срабатывание аварийной защиты во время плановой проверки систем безопасности

Энергоблок АЭС с реакторной установкой (РУ) ВВЭР-1000 работал в штатном режиме на номинальной мощности. Все три независимых канала систем безопасности (СБ) находились "в дежурстве". На первую половину дня было запланировано выполнение "Рабочей программы проверок и опробований автоматики ступенчатого пуска (АСП) энергоблока", отвечающей за ступенчатый пуск СБ от дизель-генераторов (разворот за 15 секунд) при потере напряжения 6 кВ на шинах надёжного питания.

В 9:40 начальник смены АЭС (НС АЭС) провёл целевой инструктаж начальнику смены цеха тепловой автоматики и измерения (НС ЦТАИ). После этого НС ЦТАИ провёл целевой инструктаж подчинённому персоналу, который затем приступил к подготовительным работам по проведению с БЩУ планового опробования АСП третьего канала СБ в режиме "Аварийное расхолаживание РУ от технологической защиты первого контура № 23.4 (давление в гермооболочке реакторного отделения $P_{го} > 0.3$ кгс/см²) с последующим обесточением надёжного питания".

В 9:59 при выполнении п. 22 чек-листа рабочей программы НС АЭС дал команду НС ЦТАИ имитировать технологическую защиту (ТЗ) № 23.4. НС ЦТАИ подтвердил полученное распоряжение и дал команду дежурному инженеру системы управления и защиты реактора (ДИ СУЗ) имитировать ТЗ № 23.4 на бортовых компьютерах (БК) шкафов формирования сигналов ШФС-32 и ШФС-33 (рис. 2) программно-технического комплекса (ПТК) управляющей системы безопасности третьего канала СБ (УСБ-3).

В 10:00:31 при выполнении действий по имитации ТЗ № 23.4 ($P_{го} > 0,3$ кгс/см²) ДИ СУЗ ошибочно имитировал уставку « $P_{го} > 0,7$ кгс/см²» на БК ШФС-32 и ШФС-33 УСБ-3, тем самым инициировав действие ТЗ № 23.2, по которой отключился второй главный циркуляционный насос (ГЦН-2), сработало устройство разгрузки и ограничения мощности реактора (РОМ); закрылась локализирующая арматура третьего канала СБ; отключились ГЦН-4, 3 и 1; сформировался сигнал ускоренной предупредительной защиты реактора (УПЗ - падение одной группы органов регулирования СУЗ); сформировался сигнал аварийной защиты реактора (АЗ - падение всех групп органов регулирования СУЗ в активную зону реактора под действием собственного веса). Энергоблок был остановлен и к вечеру следующего дня снова выведен на полную мощность. Сразу после

срабатывания аварийной защиты НС ЦТАИ и ДИ СУЗ доложили заместителю начальника цеха ТАИ о допущенной ошибке.

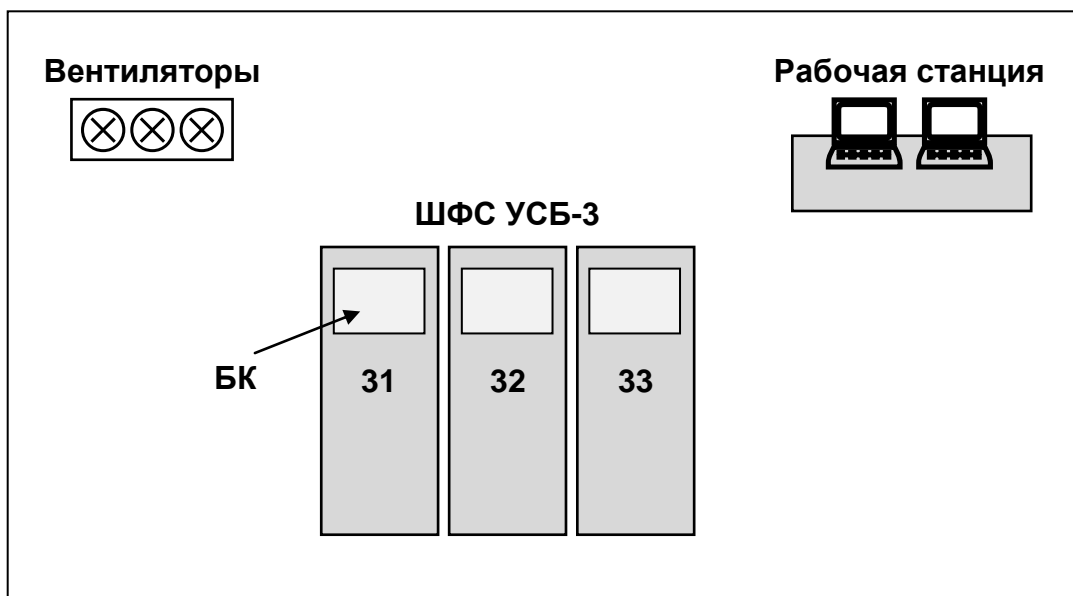


Рисунок 2. Принципиальная схема помещения ПТК УСБ-3.

Анализ инцидента комиссией по расследованию позволил установить, что имитация сигналов в любом из ШФС осуществляется с помощью вкладки «Имитация» на мониторе БК, оснащённым сенсорным экраном. Для имитации уставки с помощью сенсорного экрана или клавиатуры достаточно (рис. 3) выделить строку с необходимым сигналом из списка 17 параметров, пометить её "галочкой", после чего нажать кнопку «Применить» и подтвердить своё действие нажатием кнопки «Да» в появившемся диалоговом окне. Состояние имитированных уставок контролируется по двум мониторам рабочей станции ПТК УСБ-3 (рис. 2). Для имитации ТЗ достаточно в любых двух ШФС УСБ-3 с помощью бортовых компьютеров выполнить шаги по имитации срабатывания уставок, которые инициируют действие защиты (для ТЗ № 23.4 это « $P_{го} > 0,3 \text{ кгс/см}^2$ »).

В ходе обучения имитации ТЗ № 23.4 на ШФС УСБ-3 персонал отрабатывает выполнение следующих конкретных действий (рис. 3):

- Исполнитель (ДИ СУЗ) на БК одного из ШФС во вкладке «Имитация» выбирает строку с надписью « $P_{го} > 0,3 \text{ кгс/см}^2$ » (Шаг 1) и убедившись в правильности выбранной уставки производит ряд хорошо известных ему элементарных действий, используя сенсорный экран или клавиши клавиатуры для её имитации (Шаги 2–4). Второй шаг можно выполнить с помощью клавиши «Пробел», а третий и четвёртый - клавиши «Ввод»;

- Контролирующее лицо (НС ЦТАИ), наблюдая действия в одном канале (ШФС), подтверждает правильность выполненной имитации и даёт разрешение на действия в другом канале (ШФС);
- Исполнитель на бортовом компьютере второго ШФС во вкладке «Имитация» выбирает строку с надписью « $P_{го} > 0,3 \text{ кгс/см}^2$ » (Шаг 1) и убедившись в правильности выбранной уставки производит ряд действий для её имитации (Шаги 2–4);
- Контролирующее лицо, проверив действия во втором канале (ШФС), подтверждает правильность выполненной имитации и сообщает НС АЭС по громкоговорящей связи об окончании работ по имитации ТЗ № 23.4.

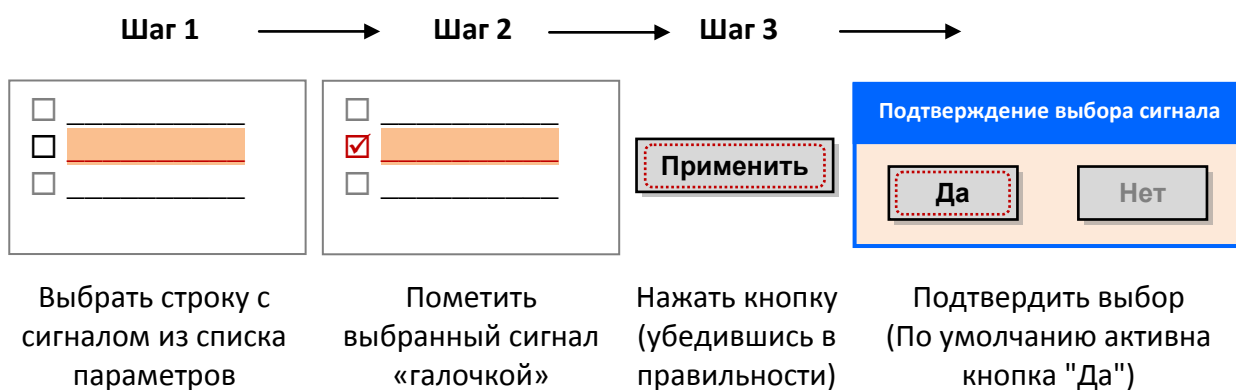


Рисунок 3. Общая схема действий по имитации сигнала на БК ШФС.

Считалось, что поскольку действия по имитации ТЗ хорошо известны дежурным инженерам СУЗ и начальникам смен цеха ТАИ, часто повторяются ими во время регламентных проверок, их перечисление в чек-листе рабочей программы является избыточным и достаточно указать лишь один пункт, как в данном инциденте: "п. 22. Дать команду ДИ СУЗ имитировать ТЗ первого контура № 23.4 в произвольной комбинации 2 из 3-х на БК ШФС-31, 32 или 33 УСБ-3".

В ходе анализа инцидента было установлено, что ДИ СУЗ и НС ЦТАИ достаточно хорошо знали не только оборудование ПТК УСБ-3, на котором производились переключения, но и досконально знали и понимали действие технологических защит № 23.4 ($P_{го} > 0,3 \text{ кгс/см}^2$) и № 23.2 ($P_{го} > 0,7 \text{ кгс/см}^2$). Операции по имитации сигналов на БК ШФС были усвоены ими во время плановой подготовки и постоянно совершенствовались, совместно с персоналом цеха ТАИ, как во время периодических ежемесячных регламентных проверок при работе энергоблока, так и во время ежегодного планово-предупредительного ремонта энергоблока. В результате последовательность выполнения ДИ СУЗ и НС ЦТАИ действий по имитации ТЗ на ШФС УСБ-3 во время инцидента

отвечала принятой в цехе ТАИ общей практике и отличалась от усвоенной ранее в процессе подготовки.

В день инцидента в 9:50 ДИ СУЗ и НС ЦТАИ приступили к следующей подготовке БК ШФС-32 и ШФС-33 к имитации ТЗ № 23.4 для опробования АСП:

- ДИ СУЗ (исполнитель) на БК ШФС-32 во вкладке «Имитация» выделил необходимую для имитации ТЗ № 23.4 строку с уставкой « $P_{го} > 0,3 \text{ кгс/см}^2$ » (рис. 3, Шаг 1);
- НС ЦТАИ (контролирующее лицо) проконтролировал правильность выбора сигнала в одном канале (ШФС-32) и дал разрешение на выполнение действий в другом канале (ШФС-33);
- ДИ СУЗ на БК ШФС-33 во вкладке «Имитация» выделил необходимую для имитации ТЗ № 23.4 строку с уставкой « $P_{го} > 0,3 \text{ кгс/см}^2$ » (рис. 3, Шаг 1);
- НС ЦТАИ проконтролировал правильность выбора сигнала во втором канале (ШФС-33).

Все подготовительные действия проводились в соответствии с "Инструкцией по производству переключений на действующем оборудовании": контролирующее лицо зачитывает по программе поставленную задачу; исполнитель повторяет задачу и указывает на оборудование, на котором выполняются переключения; контролирующее лицо убеждается в соответствии данного оборудования заданию и даёт разрешение на выполнение операций (метод трёхсторонней коммуникации).

В 9:52 НС АЭС получил доклад от НС ЦТАИ по внутренней связи о готовности БК ШФС УСБ-3 к проверке АСП. ДИ СУЗ и НС ЦТАИ стали ожидать последующих команд возле рабочей станции (рис. 2).

В 9:59 НС АЭС по громкоговорящей связи зачитал НС ЦТАИ п. 22 чек-листа рабочей программы с указанием имитировать ТЗ № 23.4. НС ЦТАИ подтвердил полученное распоряжение и дал команду ДИ СУЗ, который после этого перешёл от рабочей станции к ШФС УСБ-3 (рис. 2).

Подойдя к шкафам, ДИ СУЗ обнаружил, что мониторы БК находятся в "спящем" режиме (переход в "спящий" режим происходил, согласно настройкам, через 5 минут бездействия мониторов БК; прошло около 7 минут их "пассивного" состояния).

ДИ СУЗ активировал БК ШФС-33 касанием сенсорного экрана и быстро подтвердил выбор строки имитации сигнала, пометив её "галочкой" (Шаг 2) и дважды нажав клавишу «Ввод» на клавиатуре БК (рис. 3, Шаги 3 и 4). При этом вместо предварительно выбранной строки « $P_{го} > 0,3 \text{ кгс/см}^2$ » на мониторе БК ШФС-33 во вкладке «Имитация» была активирована строка « $P_{го} > 0,7 \text{ кгс/см}^2$ ».

Это произошло из-за особенностей выхода монитора БК из "спящего" режима при касании сенсорного экрана. В "спящем" режиме, когда монитор отключён, сенсорный экран тем не менее остаётся активным и выполняет все функции, как при включённом мониторе. Касанием в середине экрана при пробуждении монитора ДИ СУЗ была случайно выделена строка « $P_{го} > 0,7 \text{ кгс/см}^2$ », находящаяся рядом с выбранной ранее строкой « $P_{го} > 0,3 \text{ кгс/см}^2$ ».

ДИ СУЗ не заметил, что при "пробуждении" монитора он случайно сменил выбор строки с « $P_{го} > 0,3 \text{ кгс/см}^2$ » на « $P_{го} > 0,7 \text{ кгс/см}^2$ » и был убеждён, что подтвердил выбор ранее выделенной в присутствии НС ЦТАИ строки имитации сигнала. Согласно данным расследования, ДИ СУЗ многократно и успешно в своей практике выполнял действия на БК ШФС, но никогда не сталкивался с переходом мониторов в "спящий" режим и со сменой выбранной строки во вкладке «Имитация» из-за касания сенсорного экрана в этом режиме. Во время обучения особенности функционирования сенсорных экранов БК ШФС в "спящем" режиме не рассматривались.

После выполнения необходимых действий с БК ШФС-33, ДИ СУЗ со словами: "Есть имитация первого канала", перешёл к выполнению имитации ТЗ № 23.4 на ШФС-32.

Опробования АСП, с имитацией ТЗ на ШФС, проводились каждый месяц, создавая ощущение рутинности и снижая концентрацию внимания у персонала. Поэтому, когда ДИ СУЗ активировал монитор БК ШФС-32 касанием сенсорного экрана (правильно выбрав строку « $P_{го} > 0,3 \text{ кгс/см}^2$ »), он не насторожился, обнаружив, что строки имитации сигнала на экранах ШФС-32 и ШФС-33 не совпадают по уровню (соседние экраны мониторов шкафов хорошо просматривались благодаря стеклянным дверкам и близости). Поскольку ДИ СУЗ полагал, что в первом шкафу (ШФС-33) выбор строки был правильным, то он без всякой паузы, машинально изменил строку имитации сигнала на БК второго шкафа (ШФС-32), чтобы она была на одном уровне с активной строкой на БК первого шкафа. Тем самым он изменил строку « $P_{го} > 0,3 \text{ кгс/см}^2$ » на « $P_{го} > 0,7 \text{ кгс/см}^2$ ». После этого ДИ СУЗ быстро пометил строку «галочкой» (Шаг 2) и дважды нажал клавишу «Ввод» на клавиатуре (Шаги 3 и 4).

НС ЦТАИ также в своей практике не сталкивался с ошибками в работе с сенсорными экранами мониторов БК ШФС в процессе подтверждения выбранных сигналов имитации. Он был спокоен и уверен в действиях ДИ СУЗ. По сложившейся общей практике НС ЦТАИ остался возле мониторов рабочей станции, осуществляя через них контроль результатов имитации уставок ТЗ по каждому каналу (ШФС-32 и ШФС-33), не отслеживая непосредственно результаты отдельных действий ДИ СУЗ на БК ШФС для оперативного вмешательства. Заметив ошибку имитации сигнала в первом канале (ШФС-

33), НС ЦТАИ крикнул: "Почему двадцать три, два? СТОЙ!" (выбор сигнала « $P_{го} > 0,7 \text{ кгс/см}^2$ » соответствовал ТЗ № 23.2).

ДИ СУЗ услышал голос НС ЦТАИ (расстояние между операторами было около 2 метров), но из-за работающей рядом со шкафами вентиляции (рис. 2) не разобрал смысла первых слов, восприняв их (эффект психологической установки, сформированной успешным прошлым опытом) как подтверждение правильности выполненных операций в первом канале (ШФС-33). После этого он произвёл коррекцию строки и подтверждение имитации сигнала во втором канале (ШФС-32) так быстро (Шаги 1–4), что окончание всех действий совпало по времени с командой "СТОЙ!".

Анализ инцидента показал, что действия по имитации ТЗ выполнялись ДИ СУЗ на уровне автоматизма (навыка), по привычному, многократно отработанному алгоритму, с очень высокой скоростью и отсутствием пооперационной сознательной регуляции и контроля (очень высокая скорость психомоторных реакций оператора была подтверждена в ходе расследования). Комиссией было отмечено, что автоматизм действий мог быть следствием нескольких лет успешного выполнения ДИ СУЗ рутинных операций по имитации сигналов на ШФС УСБ-3. Это сформировало чувство самоуспокоенности у ДИ СУЗ, уверенность в невозможности совершения им ошибок, которые могли бы привести к останову энергоблока. Кроме этого, в этот день ДИ СУЗ предстояло сдавать выходной контроль знаний перед экзаменом по правилам технической эксплуатации электрических станций и сетей в рамках завершения подготовки без отрыва от производства на должность ведущего инженера АСУ ТП АЭС. Мысли о предстоящей в конце дня проверке знаний могли отвлечь внимание оператора от поставленной задачи (снижение уровня самоконтроля).

Напомним, что в чек-листе рабочей программы отсутствовало перечисление действий по имитации ТЗ, включая операции, которые требовали обязательного дополнительного подтверждения со стороны контролирующего лица (НС ЦТАИ). Комиссия также установила, что НС ЦТАИ в ходе целевого инструктажа не акцентировал внимание ДИ СУЗ на этих моментах. Исполнитель (ДИ СУЗ) воспринимал все операции (Шаги 2–4 на ШФС-33 и ШФС-32) как единое целое, не требующее паузы для осмысления и получения подтверждения в правильности.

В итоге комиссия пришла к мнению, что непосредственной причиной инцидента стала ошибочная имитация оператором ТЗ первого контура № 23.2 « $P_{го} > 0,7 \text{ кгс/см}^2$ » в ходе опробования АСП. Действия оператора были классифицированы как непреднамеренное отклонение от рабочей программы (ошибка-промах [23–26]). Коренной причиной инцидента было определено отсутствие детализации п. 22 чек-листа рабочей программы,

не позволившей обеспечить со стороны НС ЦТАИ необходимый контроль действий ДИ СУЗ по имитации ТЗ первого контура № 23.4 « $P_{го} > 0,3 \text{ кгс/см}^2$ ». В качестве способствующего фактора была указана особенность монитора БК ШФС сохранять активность сенсорного экрана в "спящем" режиме.

"Способствующий фактор" - это причина, устранение которой само по себе не сможет предотвратить событие, но которая повышает вероятность инцидента и тяжесть его последствий, делая её достаточно важной для принятия корректирующих мер [27–30]. Анализ действий операторов указывает, что именно активность сенсорного экрана монитора БК ШФС в "спящем" режиме стала тем фактором, который спровоцировал ошибку ДИ СУЗ. Многолетняя успешная практика персонала цеха ТАИ по имитации ТЗ первого контура на БК ШФС требовала непосредственного контроля со стороны НС ЦТАИ и подтверждения действий ДИ СУЗ лишь при выборе правильных уставок во вкладке «Имитация» (рис. 3, Шаг 1). Последующие действия ДИ СУЗ носили совершенно рутинный характер, требуя нажатия на клавиатуре один раз клавиши «Пробел» (Шаг 2) и два раза – клавиши «Ввод» (Шаги 3 и 4). Незвестная операторам активность сенсорного экрана монитора БК ШФС в "спящем" режиме сыграла решающую роль в возникновении ошибки при имитации ТЗ первого контура в ходе регулярных опробований АСП энергоблока (фактически, переход БК ШФС в "спящий" режим требовал от операторов возвращения к Шагу 1 по имитации ТЗ и непосредственного присутствия НС ЦТАИ в качестве контролирующего лица при выборе уставки в соответствии с "Инструкцией по производству переключений на действующем оборудовании"). Если бы автоматизированные действия ДИ СУЗ в ходе подтверждения выбранных сигналов имитации были выполнены до перевода мониторов БК ШФС в "спящий" режим, ошибка бы не возникла. Поэтому особенность мониторов БК ШФС сохранять активность сенсорных экранов в "спящем" режиме послужила *"коренной причиной"* исходного события - причиной, при устранении которой предотвращается повторение инцидента или снижается до минимума вероятность его повторения [12, 27, 28, 30].

Риски, обусловленные переходом мониторов БК ШФС в "спящий" режим, не были рассмотрены и учтены ни на стадии планирования работ (чек-лист рабочей программы), ни на стадии организации работ (содержание целевых инструктажей), ни в процессе подготовки операторов. Эти организационные факторы требуют принятия мер административного характера для контроля рисков в области планирования и организации работ, а также обучения персонала.

Согласно общепринятой иерархии мер управления рисками [31–33] (рис. 4), особое внимание необходимо уделять полному устранению опасного фактора. В нашем случае

это активность сенсорных экранов мониторов БК ШФС в "спящем" режиме. Анализ инцидента указывает, что в процессе проектирования ШФС не в полной мере были учтены факторы, которые могут повлиять на эффективность и надёжность действий операторов. Отсутствовала необходимая верификация аспектов учёта человеческих факторов для определения соответствия разработанного интерфейса "человек-система" принятым принципам эргономики при проектировании, позволяющим персоналу безошибочно и безопасно для эксплуатации АЭС выполнять свои задачи [15, 16]. Ни активность сенсорных экранов мониторов БК ШФС в "спящем" режиме, ни переход в "спящий" режим мониторов через 5 минут бездействия БК ШФС не отвечают руководящим принципам проектирования в области эргономики, поскольку создают реальные условия для ошибок операторов. В процессе проектирования ШФС не была проведена требуемая валидация аспектов HFE для подтверждения того, что интерфейс "человек-система" обеспечивает надёжность действий персонала и эксплуатации АЭС при переходе мониторов БК ШФС в "спящий" режим [16]. Активность сенсорных экранов мониторов БК ШФС в "спящем" режиме не нашла должного отражения в документации по эксплуатации ШФС, и соответствующие риски не были выявлены и учтены при планировании и организации работ, а также при подготовке персонала [16]. В итоге операторы не обладали необходимыми знаниями относительно активности сенсорных экранов мониторов БК ШФС в "спящем" режиме, чтобы дополнительно контролировать результаты своих действий при активировании мониторов БК.

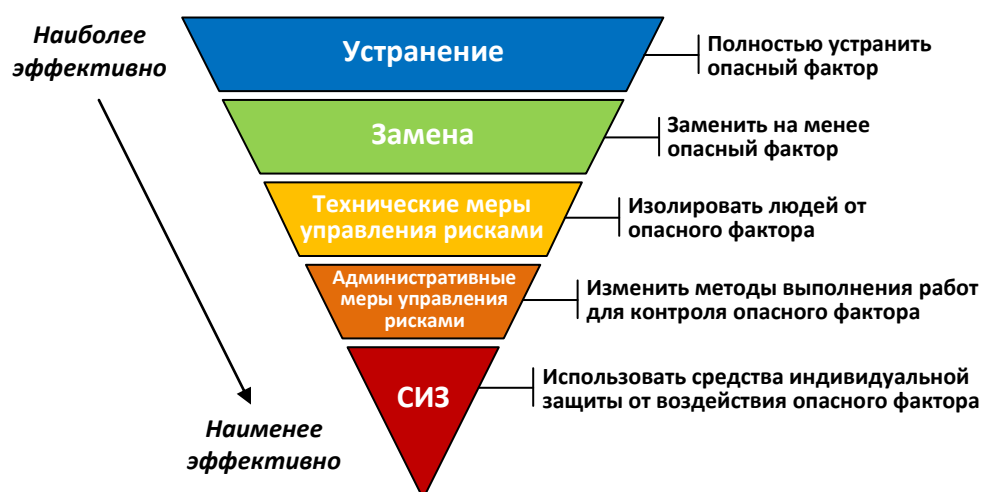


Рисунок 4. Иерархия мер управления опасными факторами (рисками).

В качестве корректирующей меры по устранению рисков активности сенсорных экранов мониторов в "спящем" режиме персоналом цеха ТАИ АЭС была предложена модификация программного обеспечения БК ШФС. После выбора уставки из полного

списка 17 параметров на вкладке «Имитация» (Шаг 1) должна выводиться дополнительная вкладка, на которой отражается лишь тот параметр рабочей программы проверок и опробований АСП энергоблока, который оператору необходимо в дальнейшем подтвердить (Шаги 2–4). В этом случае исключается возможность ошибочного выбора оператором строки при активации монитора БК ШФС в "спящем" режиме путём касания сенсорного экрана. Данная модификация интерфейса "человек-система" позволяет устранить коренную причину инцидента, обусловленную особенностями сенсорных экранов мониторов БК ШФС.

В заключение рассмотрения данного инцидента отметим, что согласно собранной комиссией информации, НС ЦТАИ и ДИ СУЗ отлично зарекомендовали себя в цехе ТАИ (например, ДИ СУЗ был призёром конкурса профессионального мастерства, готовился на новую должность). Данные периодических обследований операторов указывали на высокий уровень их психических процессов (восприятия, внимания, памяти, мышления) по большинству методик. Всё это подтверждает один из базовых принципов обеспечения надёжности деятельности человека [10, 26, 30, 34, 35]: *Людям свойственно ошибаться, и даже лучшие специалисты совершают ошибки.* Этот принцип важно учитывать как при расследованиях, так и при проектировании интерфейсов "человек-система", при планировании и организации работ, а также в процессе подготовки персонала. Выявленные проблемы самоконтроля ДИ СУЗ при автоматизированном выполнении рутинных операций, в первую очередь должны решаться, следуя иерархии мер управления опасными факторами, через приведение в соответствие интерфейса "человек-система" (оператор - БК ШФС) руководящим указаниям НФЕ при проектировании [16].

Снижение мощности энергоблока из-за случайного воздействия на ключ режимов регулятора возбуждения турбогенератора

Энергоблок АЭС с РУ БН-600 и с тремя турбогенераторами (ТГ) мощностью по 200 МВт работал в штатном режиме на номинальном уровне мощности. В 8:34 начальник смены электроцеха (НС ЭЦ) начал оперативное регулирование реактивной мощности турбогенератора (ТГ). Это регулирование осуществлялось поворотом возвратного ключа регулирования уставки напряжения статора (1КР) с контролем величины реактивной мощности. Через 54 секунды произошло срабатывание сигнализации перевода регулятора возбуждения ТГ из "автоматического режима" в "ручной режим" и обратно, а затем отключение ТГ защитой от потери возбуждения. В результате мощность энергоблока снизилась на 33%.

В ходе расследования было установлено, что вместо возвратного ключа 1КР, НС ЭЦ непреднамеренно воздействовал на рядом расположенный двухпозиционный ключ

перевода режима регулятора возбуждения ТГ (КПР). Ключ КПР, в отличие от ключа 1КР, имел два фиксированных положения: «Автоматический режим» (АРВ) и «Ручной режим» (БРУ). Но вследствие конструктивных особенностей почувствовать разницу в поведении ключей было трудно. Двухпозиционный ключ КПР вёл себя аналогично возвратному ключу 1КР вплоть до поворота на 45° (как по усилиям, так и по возвращению в исходное положение). Кроме этого, оба ключа были визуально одинаковые.

Исходя из опыта воздействия на ключ 1КР, НС ЭЦ (случайно взявшись за ключ перевода режима регулятора возбуждения ТГ) трижды выполнил операцию поворота ключа КПР на небольшой угол и возврата его в исходное положение. Такой способ управления объяснялся инерционностью движения сельсина, управляемого ключом 1КР и действующего на изменение уставки реактивной мощности. После третьего поворота и возврата ключа КПР, произошло срабатывание сигнализации перевода регулятора возбуждения из "автоматического режима" в "ручной режим" и обратно, а затем и отключение ТГ защитой от потери возбуждения.

Анализ и проведённые испытания показали, что конструкция двухпозиционного ключа КПР такова, что замыкание его контактов происходит при повороте примерно на 45°, а не в момент фиксации положения в одном из двух режимов при повороте на 90°. При повороте ключа КПР примерно на 45° происходит перевод управления с АРВ на БРУ, а при возврате в исходное положение - обратный переход с БРУ на АРВ. Таким образом, произошло отключение и новая подача напряжения на усилитель регулятора, после чего регулятор осуществил автоматическую подгонку режимов. Это вызвало переходный процесс в регулировании возбуждения (отказ системы возбуждения был обусловлен конструктивной ошибкой регулятора возбуждения), приведший к потреблению ТГ реактивной мощности из сети. ТГ был отключён защитой от потери возбуждения, которая предотвратила асинхронный режим работы ТГ.

Непосредственной причиной события стало непреднамеренное воздействие НС ЭЦ на ключ КПР (ошибка-промах [23–26]). Многократно и успешно выполняемое в ходе смен оперативное регулирование реактивной мощности ТГ с помощью рутинных поворотов ключа 1КР сформировало у НС ЭЦ автоматизм действий, не требующий сознательного контроля при выборе ключа для регулирования реактивной мощности. Переход действий на уровень автоматизма в ситуации инцидента мог быть вызван функциональным состоянием оператора (начало смены), отвлечением внимания на внутренние или внешние факторы [26].

Коренной причиной инцидента были определены недостатки проектирования: расположение рядом на оперативном пульте визуально одинаковых ключей с

конструктивными особенностями, не позволяющими почувствовать разницу при регулировании реактивной мощности. Ключ 1КР предназначался для постоянного оперативного регулирования параметра, а воздействие на ключ КПР допускалось лишь в особых ситуациях. При этом ключ КПР не имел защитного колпачка, чтобы предотвратить непреднамеренное воздействие оператора. Возможность такой ошибки отсутствовала в документации по эксплуатации и в программах подготовки персонала ЭЦ АЭС.

Как и в предыдущем инциденте, отсутствовала необходимая верификация и валидация аспектов НФЕ для определения соответствия разработанного интерфейса "человек-система" (пульт управления НС ЭЦ) принятым принципам проектирования в области эргономики [4, 15, 16]. Органы управления (ключи 1КР и КПР) располагались рядом на оперативном пульте, визуально не отличались, вели себя аналогичным образом при повороте на 45°. Ключ КПР, используемый в особых ситуациях, в отличие от ключа 1КР, с которым постоянно в течение смены взаимодействовали операторы, не имел необходимого защитного колпачка. В ходе проектирования не были учтены аспекты НФЕ, связанные с особенностью формирования у человека навыка при многократном успешном выполнении стереотипных операций с органом управления, когда действия переходят на уровень автоматизма, не требующего осознанного контроля для подтверждения выбранного органа управления (ключа, кнопки) на оперативном пульте [16]. Формирование навыка, переход действий на уровень автоматизма создаёт "благодатную почву" для возникновения ошибок-действий ("промахов") и ошибок-бездействий ("упущений") из-за переключений внимания оператора на объекты (внешние, внутренние), не связанные с выполнением задачи.

В процессе проектирования не была проведена требуемая валидация разработанного оперативного пульта НС ЭЦ, с привлечением эксплуатационного персонала, имеющего опыт работы, для оценки способности интерфейса "человек-система" обеспечить надёжность действий операторов и безопасность эксплуатации АЭС. В итоге спроектированный пульт управления НС ЭЦ содержал явные недостатки эргономики, которые не были выявлены и устранены в процессе эксплуатации, и привели к непреднамеренным действиям оператора, вызвавшим останов турбогенератора и снижение мощности АЭС.

Отключение энергоблока АЭС от сети в результате ошибочных действий персонала

Энергоблок АЭС с РУ РБМК-1000 работал в режиме подъёма мощности после капитального предупредительного ремонта. Были введены защиты согласно технологическому регламенту. В работе находился ТГ-2.

Во время приёма смены в 8:05 ведущий инженер управления турбиной (ВИУТ) обратил внимание на неподписанный ключ предотвращения развития пожара (КПРП). Ключ КПРП располагался на пульте 5Т контура неоперативного управления БЩУ (БЩУ-Н) и имел два положения, обозначенные надписями «Введено» и «Выведено». ВИУТ заметил, что ключ КПРП находился в положении «Выведено». Он доложил заместителю начальника смены станции (ЗНСС) о необходимости перевести ключ КПРП в положение «Введено». В 8:35 ЗНСС сообщил НС ЦТАИ о необходимости ввести защиту в действие. В 8:40 НС ЦТАИ прибыл на БЩУ и осмотрел релейную часть защит ТГ-2 на панелях управления пожаротушением БЩУ-Н. Получив разрешение от ЗНСС, в 8:44 НС ЦТАИ перевёл ключ КПРП в положение «Введено». В следующие секунды последовали останов турбины со срывом вакуума и отключение ТГ-2 от сети. На реакторе сформировался режим АЗ, который прошёл без замечаний. Время вынужденного простоя энергоблока составило 16 часов 41 минуту.

В ходе расследования инцидента было установлено, что останов турбины со срывом вакуума и отключением ТГ-2 от сети был вызван действием предусмотренного проектом алгоритма предотвращения развития загорания масла на ТГ-2 ("Пожар масла") после перевода НС ЦТАИ ключа КПРП в положение «Введено».

Ключ КПРП был частью системы предотвращения развития загорания масла. В станционной "Инструкции по эксплуатации ТЗ и блокировок энергоблока" алгоритм "Пожар масла" указан в перечне автоматических защит, действующих на останов ТГ. Общим для большинства автоматических защит и блокировок на АЭС является возможность их ввода/вывода двухпозиционным ключом. Надпись «Введено» подразумевает ввод ТЗ в режим ожидания, а надпись «Выведено» – вывод или отключение ТЗ. Исходя из своего опыта, операторы пришли к мнению о необходимости перевести ключ КПРП из положения "Выведено" в положение «Введено» с целью ввода защиты турбины по предотвращению развития загорания масла.

Но алгоритм "Пожар масла" не являлся частью автоматической системы управления и защиты турбины, поскольку не запускался автоматически по отклонению параметров до уставок срабатывания. Он приводился в действие оператором путём поворота ключа КПРП в положение «Пожар». Эксплуатационная схема технологических защит ТГ

энергоблока предусматривала два положения ключа КППП: «Отключено» и «Пожар». Комиссия по расследованию выяснила, что при восстановлении маркировки пультов и панелей БЩУ после покраски, надписи к ключам КППП «Отключено» и «Пожар» были заменены (в нарушении действующего технического решения) на стандартные - «Выведено» и «Введено» соответственно. (В отчёте по расследованию не указано, как долго операторы БЩУ работали с неправильной маркировкой положений ключей КППП.)

Анализ показывает, что непосредственной причиной инцидента стали неправильные действия оперативного персонала, которые классифицируются как ошибочное решение или ошибка-заблуждение [23–26]. Неправильное решение операторов о необходимости перевести ключ КППП из положения «Выведено» в положение «Введено», с целью ввода защиты турбины по предотвращению развития пожара, стало следствием вводящей в заблуждение маркировки неподписанного ключа КППП и недостатков подготовки персонала. Это *очевидные причины* инцидента - причины, которые легко определяются по имеющейся информации без проведения последующего углублённого расследования для определения корректирующих мер [27, 28]. Маркировка ключа указывала, что он является элементом автоматической защиты работающего ТГ-2, а его положение – что защита не введена в действие. В отчёте по расследованию не указано, когда и какую подготовку получил оперативный персонал по использованию специального ключа КППП при воспламенении масла на ТГ. Очевидно, что она была недостаточной, если три оперативника, ЗНСС, НС ЦТАИ и ВИУТ, который должен при необходимости перевести ключ КППП в положение «Пожар», были введены в заблуждение его ошибочной маркировкой.

В отчёте не сказано, было ли известно операторам, что ключ КППП относится к системе предотвращения развития загорания масла на ТГ, а также, было ли известно операторам, что система не является автоматической защитой и запускается поворотом ключа в положение «Пожар». В отчёте отсутствует анализ теоретических и практических (на тренажёре) занятий, посвященных вопросам действий оперативного персонала при воспламенении масла на ТГ.

В отчёте не рассмотрены вопросы ошибочной маркировки ключей КППП - органов управления для запуска важной для безопасности турбины системы. Кто отвечал за восстановление маркировки пультов и панелей БЩУ после покраски? Какая программа ответственна за контроль правильности маркировки оборудования на станции? Почему она оказалась неэффективной? Почему система предотвращения развития загорания масла на ТГ в "Инструкции по эксплуатации ТЗ и блокировок энергоблока" приведена в перечне защит, запускаемых автоматически по отклонению параметров до уставок срабатывания?

Материалы отчёта по расследованию данного инцидента дают возможность сформулировать лишь непосредственные и очевидные причины и поставить вопросы, ответы на которые могут позволить определить коренные причины события.

Допущенная операторами ошибка-заблуждение представляет собой неправильное решение, повлекшее действия по переводу ключа КПП в положение «Введено». Это решение было основано на сбивающей с толку информации (ошибочная маркировка ключа) и отсутствии или недостаточности (не было выяснено в ходе расследования) требуемой подготовки персонала. Оба эти фактора должны быть в центре внимания программы HFE или специалистов в области эргономики [4, 16]. Следует помнить, что операторы БЩУ в различных штатных и аварийных режимах взаимодействуют с многочисленными органами управления (ключи, кнопки) и контролируют тысячи аналоговых (температура, давление, расход) и дискретных (состояние арматуры, сигнализации) параметров. Например, для БЩУ ВВЭР-1000 это свыше 5000 аналоговых и 12000 дискретных параметров [36]. Если на это накладываются вводящие в заблуждение маркировка оборудования, состояние арматуры [1, 2], показания приборов, а также недостатки подготовки персонала, тогда возникновение инцидента из-за неправильных действий человека – только вопрос времени.

Программа HFE подчёркивает важность мониторинга деятельности человека с целью постоянного контроля выполнения персоналом своих задач для проверки отсутствия снижения безопасной и надёжной эксплуатации АЭС вследствие каких-либо изменений, внесённых в интерфейс "человек-система", в процедуры или программы обучения. В рассмотренном инциденте станцией не были своевременно выявлены и устранены недостатки маркировки ключа на пульте БЩУ и пробелы в подготовке операторов. Программа HFE предполагает контроль человеческих факторов не только на стадиях разработки и внедрения проектов, но и в процессе их реализации [4, 16].

Выводы

Опыт безопасной эксплуатации электростанций в атомной энергетике показывает, что ошибки вследствие недостатков учёта человеческих факторов в процессе проектирования или модификации (реконструкции, модернизации) конструкций, систем и компонентов АЭС, процедур и программ обучения персонала играют важную роль в возникновении и развитии инцидентов и аварий на атомных станциях.

Одной из программ, призванной предупредить неправильные действия человека в рамках принятой на АЭС концепции глубокоэшелонированной защиты, является программа инженерии человеческих факторов, интегрированная в процессы проектирования и модификации конструкций, систем и компонентов АЭС, процедур и

программ обучения персонала и учитывающая вопросы эргономики, которые могут влиять на эффективность и надёжность действий человека [4, 16].

Согласно модели NRC [4], программа HFE включает в себя 12 элементов: управление программой, анализ опыта эксплуатации, функциональный анализ и распределение функций, анализ рабочих заданий, анализ важных действий человека, проектирование интерфейсов "человек-система", разработка процедур, разработка программ обучения, верификация и валидация эргономических аспектов проектов, внедрение проектов и мониторинг деятельности человека.

В документах МАГАТЭ представлены структурированный подход, рекомендации и руководящие указания по применению HFE на всех стадиях разработки, реализации и модификации проектов интерфейсов "человек-машина" с целью исключения ошибок, вызванных неправильными действиями человека, или смягчения их последствий [8, 16, 20].

Рассмотренные в статье инциденты, выявленные эргономические причины и условия неправильных действий эксплуатационного персонала обосновывают важность систематического учёта человеческих факторов как на стадии разработки, так и реализации интерфейсов "человек-система" [16] (включая расследования нарушений и отклонений в работе АЭС [18] и систематические оценки безопасности АЭС [37]). В работах ряда ведущих исследователей подчёркивается фундаментальное значение инженерии человеческих факторов (недостатков эргономики) в большинстве нарушений безопасности в атомной отрасли [38, 39]. Недостатки внимания к вопросам эргономики рабочих мест, согласно Международной организации труда, определяют постоянно высокий уровень и рост несчастных случаев и профессиональных заболеваний [40].

Безопасность, как неотъемлемая часть всех видов деятельности на АЭС, согласно МАГАТЭ, является одной из характеристик сильной культуры безопасности [41]. На станции должны быть созданы хорошие условия труда персонала в отношении временного прессинга (отсутствие спешки), рабочих нагрузок (физических или психических) и стрессов. Организации должны привлекать специалистов в области эргономики для решения этих вопросов и учёта человеческих факторов при проектировании и модификации конструкций, систем и компонентов АЭС, процедур и программ обучения персонала [16].

Внедрение программы инженерии человеческих факторов и следование рекомендациям и руководящим указаниям в области эргономики, сформулированным МАГАТЭ, направлено на формирование сильной культуры безопасности и достижение

высоких и устойчивых показателей безопасности АЭС и надёжности деятельности персонала.

Список литературы

1. *Машин, В.А.* Культура безопасности: Система учёта опыта эксплуатации [Текст] / В.А. Машин // Электрические станции. – 2017. – № 7. – С. 2–13.
2. *Машин, В.А.* Культура безопасности: Система учёта человеческого фактора [Текст] / В.А. Машин // Электрические станции. – 2017. – № 8. – С. 11–22.
3. *Чернобыльская авария: Дополнение к INSAG-1* [Текст]: Доклад Международной консультативной группы по ядерной безопасности INSAG-7. – МАГАТЭ, 1993. – 159 с.
4. *Human Factors Engineering Program Review Model* [Text]: NUREG-0711 Rev. 3. – U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2012. – 141 p.
5. *Safety-Related Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants. A Safety Guide* [Text]: IAEA Safety Series, No. 50-SG-D8. – IAEA, 1984. – 64 p.
6. *Code on the Safety of Nuclear Power Plants: Design* [Text]: IAEA Safety Series, No. 50-C-D Rev. 1. – IAEA, 1988. – 72 p.
7. *Safety of Nuclear Power Plants: Design. Requirements* [Text]: IAEA Safety Standards Series, No. NS-R-1. – IAEA, 2000. – 72 p.
8. *Безопасность атомных электростанций: проектирование. Конкретные требования безопасности* [Текст]: Серия норм безопасности МАГАТЭ № SSR-2/1. – МАГАТЭ, 2012. – 107 с.
9. *Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants. 75-INSAG-3 Rev. 1* [Text]: A Report by the International Nuclear Safety Advisory Group INSAG-12. – IAEA, 1999. – 105 p.
10. *Human Performance Improvement Handbook. Volume 1: Concepts and Principles* [Text]: DOE Standard DOE-HDBK-1028-2009. – U.S. Department of Energy, 2009. – 175 p.
11. *Модификации на атомных станциях. Руководство по безопасности* [Текст]: Серия норм безопасности МАГАТЭ № NS-G-2.3. – МАГАТЭ, 2004. – 50 с.
12. *Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности* [Текст]: Терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты. – МАГАТЭ, 2007. – 303 с.
13. *Большой психологический словарь* [Текст] / Под ред. Б. Г. Мещерякова, В. П. Зинченко – М.: АСТ, 2009. – 811 с.
14. *Human Factors Engineering Program Review Model* [Text]: NUREG-0711. – U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1994. – 93 p.
15. *Human-System Interface Design Review Guidelines* [Text]: NUREG-0700, Rev. 3. – U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2020. – 563 p.

16. *Human Factors Engineering in the Design of Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide* [Text]: IAEA Safety Standards Series No. SSG-51. – IAEA, 2019. – 104 p.
17. *Лидерство и менеджмент для обеспечения безопасности. Общие требования безопасности* [Текст]: Серия норм МАГАТЭ по безопасности № GSR, Part 2. – МАГАТЭ, 2017. – 52 с.
18. *Безопасность атомных электростанций: Ввод в эксплуатацию и эксплуатация. Конкретные требования безопасности* [Текст]: Серия норм безопасности МАГАТЭ № SSR-2/2 (Rev. 1). – МАГАТЭ, 2016. – 88 с.
19. *Operating Experience Feedback for Nuclear Installations. Specific Safety Guide* [Text]: IAEA Safety Standards Series No. SSG-50. – IAEA, 2018. – 68 p.
20. *Format and Content of the Safety Analysis Report for Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide* [Text]: IAEA Safety Standards Series No. SSG-61. – IAEA, 2021. – 218 p.
21. *Модификации на атомных станциях. Руководство по безопасности* [Текст]: Серия норм безопасности МАГАТЭ № NS-G-2.3. – МАГАТЭ, 2004. – 50 с.
22. *Периодическое рассмотрение безопасности атомных электростанций. Специальное руководство по безопасности* [Текст]: Серия норм безопасности МАГАТЭ № SSG-25. – МАГАТЭ, 2016. – 147 с.
23. *Reason, J. Managing the Risks of Organizational Accidents* [Text] / J. Reason. – Taylor & Francis, 2016. – 272 p.
24. *Машин, В.А. О нарушениях в работе атомных станций, обусловленных человеческим фактором* [Текст] / В.А. Машин // Электрические станции. – 2012. – № 3. – С. 9–15.
25. *Машин, В.А. Культура безопасности и система сбора, учёта, классификации и анализа событий низкого уровня* [Текст] / В.А. Машин // Электрические станции. – 2012. – № 8. – С. 20–28.
26. *Машин, В.А. Культура безопасности: Принцип организационного обучения* [Текст] / В.А. Машин // Электрические станции. – 2021. – № 10. – С. 34–50.
27. *Руководство по опыту эксплуатации на АЭС* [Текст]: WANO GL-2003-01. – ВАО АЭС, 2003. – 66 с.
28. *Анализ коренных причин инцидента на ядерной установке: Справочное руководство* [Текст]: IAEA-TECDOC-1756. – МАГАТЭ, 2015. – 178 с.
29. *Организация расследования значимых для безопасности и надёжности событий на атомных станциях АО «Концерн Росэнергоатом». Положение* [Текст]: РД ЭО 1.1.2.01.0163-2016. – Росэнергоатом, 2016. – 113 с.
30. *Машин, В.А. Культура безопасности: Принципы анализа событий на АЭС* [Текст] / В.А. Машин // Электрические станции. – 2015. – № 9. – С. 39–48.

31. *Системы* менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования [Текст]: ГОСТ Р 54934-2012/OHSAS 18001:2007. – М.: Росстандарт, 2013. – 28 с.
32. *Manuele, F.A.* ANSI/AIHA/ASSE Z10-2012: An Overview of the Occupational Health & Safety Management Systems Standard [Text] / F.A. Manuele // Professional Safety, April 2014. – P. 44–51.
33. *Свод* практических правил по охране труда при эксплуатации машин и механизмов [Текст]: Группа технической поддержки по вопросам достойного труда и Бюро МОТ для стран Восточной Европы и Центральной Азии. – МОТ, 2014. – 156 с.
34. *Принципы* эффективной работы персонала [Текст]: WANO GL 2002-02. – ВАО АЭС, 2003. – 33 с.
35. *Машин, В.А.* Повышение эффективности деятельности персонала АЭС [Текст] / В.А. Машин // Электрические станции. – 2013. – № 5. – С. 2–10.
36. *Дуэль, М.А.* Автоматизированное управление объектами и технологическими процессами тепловых и атомных электростанций [Текст] / М.А. Дуэль. – Харьков: КиК, 2010. – 448 с.
37. *Оценка* безопасности установок и деятельности. Общие требования безопасности [Текст]: Серия норм безопасности МАГАТЭ № GSR, Part 4 (Rev. 1). – МАГАТЭ, 2016. – 72 с.
38. *Rasmussen, J.* Risk Management in a Dynamic Society: A Modeling Problem [Text] / J. Rasmussen // Safety Science. – 1997. – Vol. 27. – No. 2/3. – P. 183–213.
39. *Reason, J.* A systems approach to organizational error [Text] / J. Reason // Ergonomics. – 1995. – Vol. 38. – No. 8. – P. 1708–1721.
40. *Уроки* эргономики: Простые и практичные решения для повышения безопасности и улучшения условий труда [Текст]: Международная организация труда в сотрудничестве с Международной ассоциацией эргономики. – МОТ, 1996. – 232 с.
41. *Система* управления для ядерных установок. Руководство по безопасности [Текст]: Серия норм МАГАТЭ по безопасности № GS-G-3.5. – МАГАТЭ, 2014. – 183 с.