

### **Культура безопасности труда и охраны здоровья**

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

E-mail: [mashin-va@mail.ru](mailto:mashin-va@mail.ru)

На примере расследования несчастного случая, произошедшего 3 мая 2015 года на распределительном устройстве подстанции ТА-53 Лос-Аламосской национальной лаборатории (LANL, Министерство энергетики США), рассмотрены современные требования, методы и принципы, направленные на формирование и поддержание высокой культуры в области безопасности труда и охраны здоровья. Проанализирована роль комплексной системы управления безопасностью LANL, опыта эксплуатации и человеческого фактора в несчастном случае. Представлены причинные факторы инцидента и рекомендованные группой расследования корректирующие меры. Рассмотрен ряд барьеров для формирования и поддержания высокой культуры безопасности. Данный материал будет полезен при планировании и надзоре за выполнением работ, а также при расследовании инцидентов и несчастных случаев на предприятиях электроэнергетической отрасли.

**Ключевые слова:** распределительное устройство, несчастный случай, культура безопасности, безопасность труда и охрана здоровья, опыт эксплуатации, человеческий фактор.

Одним из важнейших элементов интегрированной системы обеспечения безопасности АЭС [1] безусловно является система менеджмента безопасности труда и охраны здоровья (БТиОЗ). Данная система призвана в первую очередь выявлять и контролировать условия и факторы, которые влияют или могут повлиять на состояние здоровья и безопасность сотрудников или других работников (включая временных работников и персонал подрядчика) на месте выполнения работ [2].

Вопросы травматизма и несчастных случаев на производстве остаются актуальными для всей электроэнергетической отрасли, основой которой являются электрические станции различных типов. Проиллюстрируем на примере несчастного случая, который имел место на одном из объектов Министерства энергетики США (DOE), современные требования, методы и принципы, направленные на формирование и поддержание высокой культуры в области БТиОЗ.

Несчастный случай произошёл 3 мая 2015 года на электрической подстанции технической зоны 53 (ТА-53) Лос-Аламосской национальной лаборатории (LANL), одной

из шестнадцати национальных лабораторий DOE. Во время планового технического обслуживания (ПТО) распределительного устройства (РУ) электрослесарь E1 ошибочно вошёл в ячейку, находящуюся под напряжением 13.8 кВ, чтобы очистить шины с помощью промышленного аэрозольного очистителя. При распылении очистителя возникло короткое замыкание между шиной и заземлённой стенкой ячейки, с последующей вспышкой электрической дуги. В результате E1 получил серьёзные ожоги и в критическом состоянии был доставлен в ожоговый центр [3].

6 мая 2015 года на месте инцидента начала работу Объединённая группа по расследованию несчастного случая (JAIT), инициированная Национальным управлением по ядерной безопасности (NNSA) Министерства энергетики США. В состав группы из восьми членов и двух сопредседателей вошли представители NNSA и LANL. Дополнительно с группой постоянно работали два технических консультанта LANL. 5 июня группа завершила работу на площадке LANL, а 9 июля была утверждена окончательная редакция отчёта по расследованию несчастного случая [4]. В ходе расследования, используя диаграмму событий и причинных факторов, анализ барьеров и анализ изменений [5], были выявлены причинные факторы (непосредственная, способствующие и коренная причины) и сформулированы корректирующие меры, призванные исключить недостатки в системах, процессах и программах, обеспечивающих БТиОЗ персонала LANL.

В своём расследовании инцидента группа проанализировала эффективность системы комплексного управления безопасностью (Integrated Safety Management System – ISMS) [6], разработанной DOE и реализованной на всех подведомственных ей предприятиях, включая LANL. Данная система предназначена не только для управления БТиОЗ, но также применяется в области обеспечения радиационной и промышленной безопасности, безопасности окружающей среды. В документах DOE система ISM представлена руководящими принципами и основными функциями (включающими в себя требования), для реализации которых организации разрабатывают и реализуют соответствующие методы, процедуры и программы [6, 7]. Далее кратко перечислены принципы и функции, которые составляют ядро системы ISM (см. рисунок 1).

Руководящие принципы системы ISM описывают среду или контекст рабочей деятельности и определяют эффективность управления безопасностью. Большинство принципов применимо к каждой функции системы ISM и отражают накопленный опыт и результаты исследований в области культуры безопасности и высоконадёжных организаций.

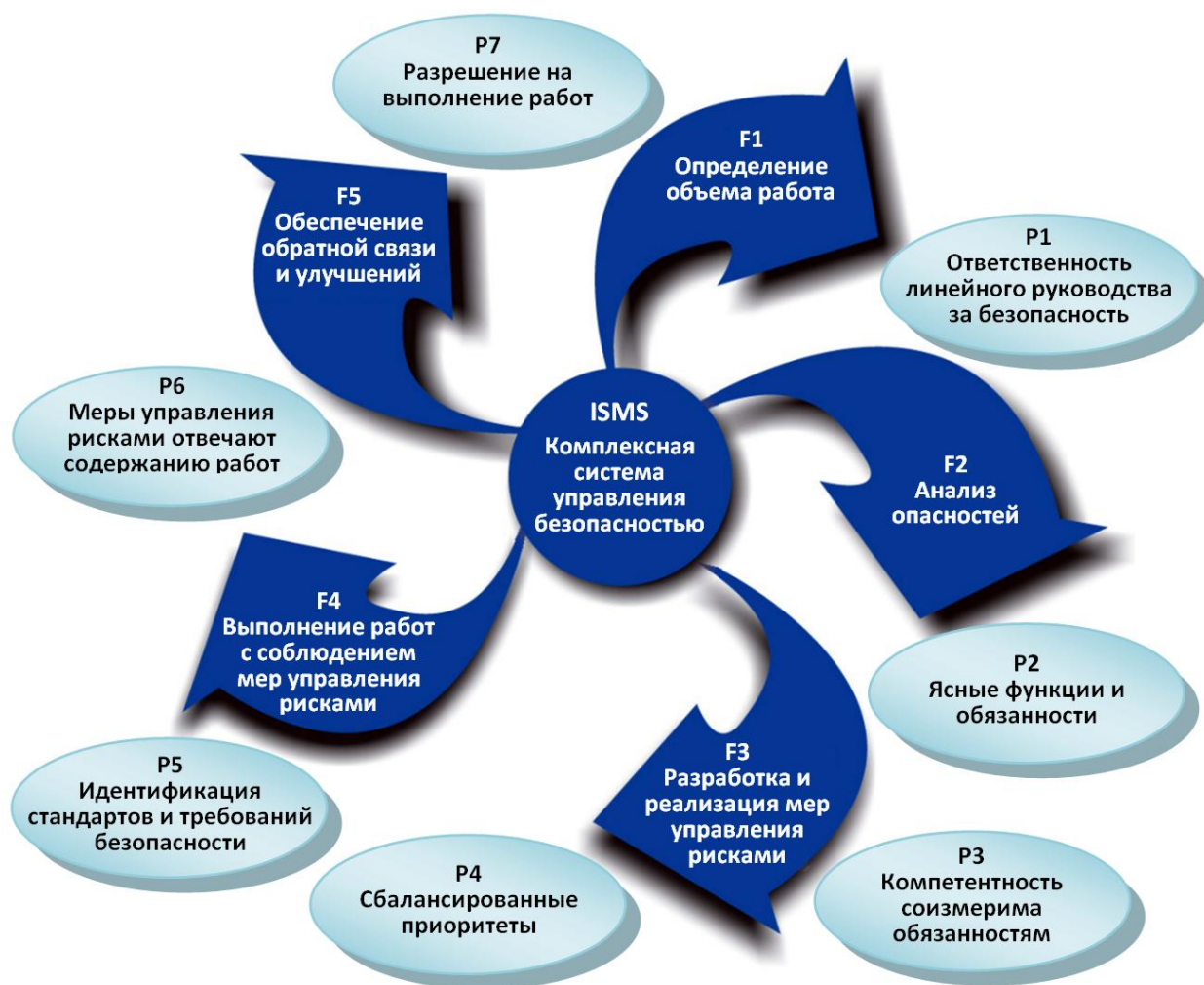


Рисунок 1. Основные функции (F) и руководящие принципы (P) комплексной системы управления безопасностью (ISMS) [6].

*P1. Ответственность линейного руководства за безопасность.* Линейное руководство несёт прямую ответственность за защиту работников, населения и окружающей среды.

*P2. Ясные функции и обязанности.* Чёткое и недвусмысленное распределение полномочий и обязанностей за обеспечение безопасности установлено и поддерживается на всех уровнях организации.

*P3. Компетентность соизмерима обязанностям.* Персонал обладает опытом, знаниями, навыками и способностями, необходимыми для выполнения своих обязанностей.

*P4. Сбалансированные приоритеты.* Ресурсы эффективно распределяются для решения вопросов безопасности, планируемых работ, с учётом оперативной ситуации. Защита рабочих, населения и окружающей среды является приоритетом при планировании и выполнении работ.

*P5. Идентификация стандартов и требований безопасности.* Перед выполнением работы оцениваются связанные с ней опасности и устанавливается согласованный набор стандартов и требований безопасности, который при правильном применении обеспечит адекватную гарантию того, что рабочие, население и окружающая среда защищены от неблагоприятных последствий.

*P6. Меры управления рисками отвечают содержанию работ.* Инженерно-технические и административные меры контроля для предотвращения и уменьшения опасностей учитывают выполняемую работу и связанные с ней угрозы.

*P7. Разрешение на выполнение работ.* Условия и требования, которые должны быть выполнены для начала и проведения работ, чётко определены и согласованы.

Основные функции системы ISM обеспечивают необходимые требования для выполнения любой работы, которая потенциально может повлиять на работников, население и окружающую среду. Функции применяются в виде непрерывного цикла со степенью строгости, соответствующей виду рабочей деятельности и связанным с ней опасностям.

*F1. Определение объёма работ.* Общие цели и задачи организации (миссия) переводятся в содержание работ: устанавливаются ожидаемые результаты, определяются и расставляются по приоритетам конкретные задачи, а также распределяются ресурсы.

*F2. Анализ опасностей.* Опасности, связанные с выполнением работ, выявляются, анализируются и классифицируются.

*F3. Разработка и реализация мер управления рисками.* Применимые стандарты и требования определены и согласованы; меры управления рисками для предотвращения и уменьшения опасностей разработаны, границы безопасности установлены и меры управления рисками внедрены.

*F4. Выполнение работ с соблюдением мер управления рисками.* Подтверждена готовность к выполнению работ и безопасное выполнение работ.

*F5. Обеспечение обратной связи и улучшений.* Собирается информация по каналам обратной связи об адекватности мер управления рисками; выявляются и реализуются возможности для непрерывного улучшения определения объёма и планирования работ.

Дополнительно группа JAIT проанализировала использование LANL извлечённых из прошлого опыта уроков для предупреждения подобных инцидентов (система учёта опыта эксплуатации [8]), а также роль человеческого фактора в расследуемом несчастном случае (система учёта человеческого фактора [9]). Далее представлено описание инцидента, результаты анализа группой роли системы ISM, опыта эксплуатации и человеческого

фактора в несчастном случае, а также перечень причинных факторов, выявленных в ходе расследования, и рекомендованных корректирующих мер.

### Описание инцидента на РУ подстанции ТА-53

В течение 2 и 3 мая (суббота и воскресенье) 2015 года бригада электриков выполняла работы по ПТО РУ подстанции ТА-53 LANL. Эта подстанция обеспечивает распределение электроэнергии между различными объектами технической зоны 53, в числе которых самый крупный объект LANL - Центр по изучению физики нейтронов (LANSCE) с линейным ускорителем пучков протонов и отрицательных ионов водорода (ускорение до энергии 800 МэВ при среднем токе пучка 1мА). Линейный ускоритель функционирует в рамках регулярных годовых циклов непрерывной работы длительностью несколько месяцев (24 часа в сутки, семь дней в неделю). Периодическое техническое обслуживание вспомогательного оборудования планируется при этом таким образом, чтобы избежать прерывания работы ускорителя [4].

К такому вспомогательному оборудованию относится подстанция ТА-53, которая принимает электроэнергию от линий электропередач 115 кВ на два трансформатора (ТР1 и ТР2), понижающие её до 13.8 кВ и передающие на секции шин А и В РУ (см. рисунок 2) [4]. Дополнительно имеется альтернативный источник электроэнергии от подстанции ТА-5, которая через питающую сеть ЕА-06 (подземный кабель) подаёт 13.8 кВ на секцию шин С РУ подстанции ТА-53 (в нормальном режиме эта сеть отключена). От распределительного устройства отходят 15 линий питания 13.8 кВ ко всем объектам ТА-53 [10].

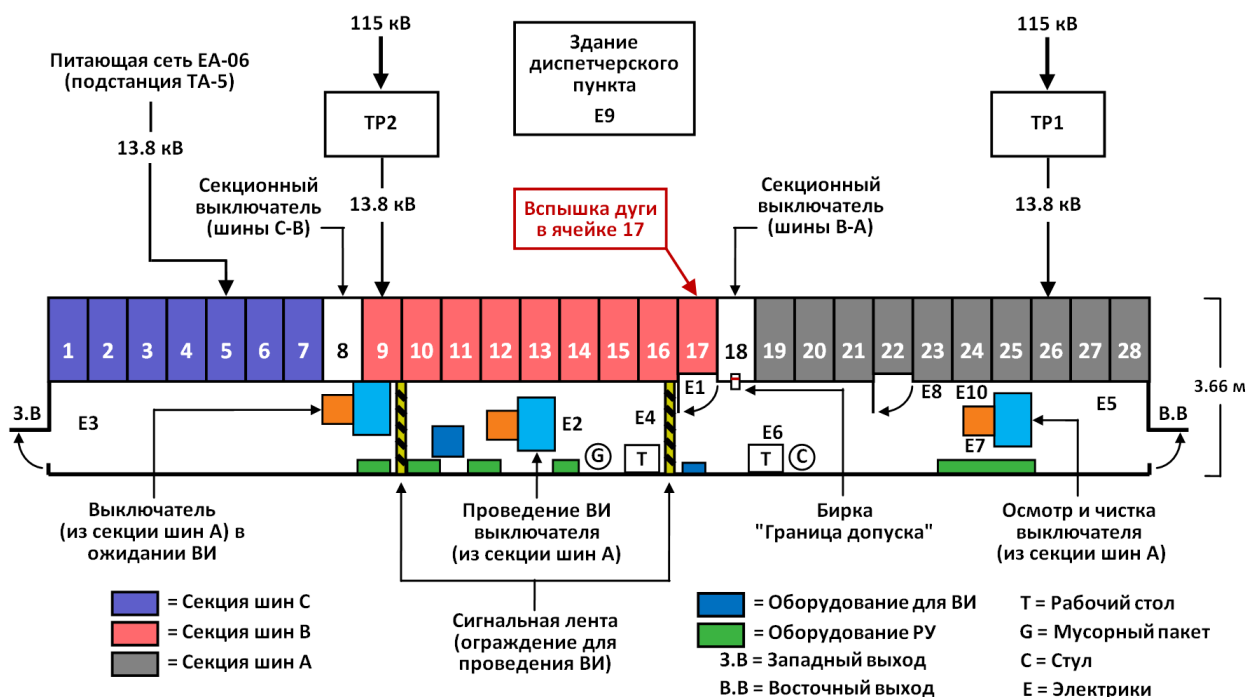


Рисунок 2. Конфигурация РУ подстанции ТА-53 в момент инцидента 3 мая 2015 года [4].

Распределительное устройство подстанции ТА-53 состоит из 28 ячеек, в которых расположены шины, воздушные автоматические выключатели, секционные выключатели и средства учёта и измерения. Все ячейки тесно примыкают друг к другу и отделены от коридора обслуживания сплошными ограждениями (дверями). Система сборных шин на токи 2000 А имеет три секции, соединённые между собой секционными выключателями, расположенными в ячейках 8 и 18. Секция шин С питает ячейки с 1 по 8, секция шин В – с 8 по 18, а секция шин А – с 18 по 28 (см. рисунок 2).

Бригада электриков службы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) одновременно работала по двум нарядам ПТО РУ подстанции ТА-53: раз в 5 лет ПТО ячеек РУ (ПТО-5, осмотр, чистка шин) и раз в 2 года ПТО выключателей РУ (ПТО-2, осмотр, испытания). Бригада состояла из электрослесарей (ТО электроустановок до 69 кВ) и электромонтёров (ТО электроустановок до 230 кВ). В субботу 2 мая перед началом работ все секции шин РУ были обесточены. К вечеру электромонтёры очистили с внешней стороны все ячейки РУ, а электрослесари выполнили работы по ТО выключателей (ПТО-2) и очистке шин ячеек с 1 по 18 секций С и В (ПТО-5). После этого на секции шин С и В электромонтёрами было подано напряжение, чтобы восстановить надёжное энергоснабжение вакуумного насоса линейного ускорителя LANSCE, отключив подачу питания от резервных генераторов. Секция шин А оставалась обесточенной и электромонтёры прикрепили на ручку секционного выключателя ячейки 18 небольшую белую бирку "Граница допуска" ("Clearance Limit"), на которой от руки было указано, что "к западу" от бирки ячейки были под напряжением, а "к востоку" от бирки - обесточены (размеры бирки, приблизительно 70×115 мм).

Поскольку до выходных члены бригады отработали 40-часовую рабочую неделю, а подстанция находилась на приличном расстоянии от большинства домов работников, были приняты меры к тому, чтобы бригада остановилась в ближайшей гостинице и все имели больше времени для отдыха. 2 мая бригада проработала 14 часов (с 6:00 до 20:00).

В воскресенье 3 мая ответственный руководитель работ и два других электромонтёра из бригады отсутствовали в связи с обучением за пределами LANL. Функции ответственного руководителя работ перешли к одному из его заместителей, старшему мастеру-электрослесарю Е9. Утром к работам на РУ приступили 10 человек (девять электрослесарей, включая старшего мастера, и один электромонтёр). Все имели практический опыт выполнения работ по ПТО-2 и ПТО-5, за исключением электрослесаря Е4 и ученика электрослесаря Е7. Кроме этого, лишь у электрослесаря Е4 не было практического опыта работы на РУ (он обслуживал светофоры и прошёл краткое обучение на рабочем месте в РУ).

Рабочий день начался в 6:30 с краткого инструктажа, который провёл мастер-электрослесарь Е3 в присутствии ответственного руководителя работ Е9. Инструктаж проходил непосредственно перед ячейкой 18, на которой висела бирка "Границы допуска". Мастер разъяснил всем членам бригады, что данная бирка означает границу между запитанными ячейками и обесточенными. Он проинформировал, что секции шин С и В (ячейки 1–18) сегодня находятся под напряжением 13.8 кВ и все работы в этот день будут выполняться ТОЛЬКО на секции шин А (ячейки с 19 по 28), которая оставалась обесточенной. Были рассмотрены основные опасности и меры управления рисками.

Приблизительно в 7:30 электрики приступили к работе: обслуживание и высоковольтные испытания воздушных автоматических выключателей (ПТО-2) и чистка шин ячеек (ПТО-5) секции шин А. Зона проведения высоковольтных испытаний (ВИ) располагалась в коридоре РУ напротив ячеек с 10 по 16 и была огорожена жёлтыми сигнальными лентами с непрерывной предупреждающей надписью чёрного цвета. Опасная зона для ячеек под напряжением (ячейки 1–18) или зона для выполнения работ ПТО-5 (ячейки 19–20) установлены не были (см. рисунок 2).

Примерно в 11:00, после очистки шин, по крайней мере, одной ячейки секции А, электрослесарь Е1 вошёл в ячейку 17 (секция шин В), находящуюся под напряжением 13.8 кВ. На нём были следующие средства индивидуальной защиты (СИЗ): нитриловые перчатки, рубашка с длинными рукавами из термостойкого материала для защиты от электрической дуги, рабочий полукombineзон (без защиты от вспышки дуги) и бейсболка. Примерно в 11:04 Е1 снял стальные защитные панели, чтобы получить доступ к шинам и выполнить очистку их поверхности. После этого он распылил промышленный жидкий очиститель в воздушный зазор между шиной фазы С и заземлённым корпусом ячейки 17. За этим немедленно последовало короткое замыкание, сопровождаемое открытой электрической дугой (согласно системе мониторинга, в 11:08). Взрывной волной электрослесаря Е1 выбросило из ячейки на пол коридора, где он затылком ударился о микрометр, лежащий у стены, и получил незначительную рваную рану. Тепловое воздействие электрической дуги вызвало ожоги рук, запястий, лица, шеи и туловища (свыше 30% поверхности тела). Электрослесарь Е2 оперативно потушил одежду на Е1, помог её снять и стал прикладывать прохладные влажные куски материи к обожжённым местам. В критическом состоянии Е1 был оперативно доставлен в ожоговый центр.

## **Анализ комплексной системы управления безопасностью LANL**

### ***F1. Определение объёма работ***

Типичный процесс разработки порядка выполнения работ по ПТО занимает в LANL около восьми недель. Время планирования было сокращено из-за графика отключения оборудования LANSCE и объединения работ по ПТО-2 и ПТО-5. Намеченные на 16 и 17 мая работы были перенесены на 2 и 3 мая 2015 года

Изначально планировалось, что РУ подстанции ТА-53 будет обесточено в течение всех выходных дней 2 и 3 мая. Однако 28 апреля, после недельного обсуждения, служба ТООиР внесла предложение возобновить вечером в субботу 2 мая подачу напряжения на секции шин С и В, при сохранении обесточенной секции шин А. Это предложение было одобрено руководством, поскольку позволяло перевести энергоснабжение вакуумного насоса и другого оборудования линейного ускорителя с резервных генераторов на источник надёжного питания.

Так как работы по ПТО РУ подстанции ТА-53 проводились с регулярной периодичностью, для них несколько лет назад были разработаны два пакета типовой документации (для ПТО-2 и ПТО-5) с единой структурой нарядов и форм для производства работ. Они успешно применялись в предыдущие периоды, когда работы выполнялись отдельно (ПТО-5 – в 2010 году, ПТО-2 – в 2011 и 2013 годах), поэтому специалист по планированию без изменений включил их в пакет документации для работ 2 и 3 мая.

При этом описание работ для обоих ПТО (Форма 2100-WC) носило крайне общий характер, без детализации на уровне конкретных заданий. Например, описание работ для ПТО-5 требовало: 1) обесточить секции шин; 2) протереть, очистить и проверить шины в ячейках; 3) выполнить повторную подачу напряжения на секции шин. Кроме этого, объём работ и шаги выполнения ПТО-5 не включали информацию, связанную с работой, когда часть секций шин РУ находится под напряжением (для работ в субботу и воскресенье использовался один пакет рабочих документов).

Объём работ по ПТО РУ подстанции ТА-53 был описан в таком обобщённом виде, чтобы обеспечить максимальную гибкость выполнения работ. В результате опасности на уровне конкретных заданий не были должным образом определены, проанализированы и проконтролированы. Заметим, что план обесточивания всех секций шин РУ включал детальные инструкции по переключениям для электромонтёров.

### ***F2. Анализ опасностей***

После определения объёма работ на РУ подстанции ТА-53 (ПТО-2 и ПТО-5), они были квалифицированы как работы с умеренной опасностью. Согласно процедуре, это требовало использовать ряд инструментов и подходов для анализа опасностей при



выполнении работ, например, анализ опасности и работоспособности (HAZOP) [11], определяющий угрозы, связанные с потенциальными несчастными случаями или инцидентами, и какой вред они могут вызвать. Но для проведения этого анализа необходимо определить и спланировать каждую задачу и шаги её выполнения таким образом, чтобы выявить связанные с ними опасности и установить соответствующие меры управления рисками. Поскольку работы были описаны в общем виде, не на уровне конкретных заданий, такой анализ опасностей не был проведен.

В результате не были проанализированы риски следующих важных факторов:

- одновременное выполнение ПТО-2 и ПТО-5, что способствовало беспорядку и загромождению рабочего пространства, наличию большого числа исполнителей в рабочей зоне (см. рисунок 2);
- планы по изменению конфигурации электрической схемы РУ, связанные с выполнением работ в субботу 2 мая в условиях обесточивания всех секций шин, а в воскресенье 3 мая – подачи напряжения на секции шин С и В;
- возможность человеческой ошибки и случайного проникновения в ячейку для выполнения работ на оборудовании, находящемся под напряжением.

Невыполнение этого анализа привело к упущенной возможности включить меры управления рисками на уровне конкретных заданий, в частности, определения чётких границ выполнения работ и разграничения оборудования, находящегося под напряжением и обесточенного.

### ***ФЗ. Разработка и реализация мер управления рисками***

Процесс разработки и реализации мер управления рисками детально описан в процедурах LANL и включает различные формы проверки и валидации выбранных мер перед утверждением. Для запланированных на РУ подстанции ТА-53 работ были определены следующие меры:

- СИЗ: каска, защитные очки, рубашка с длинными рукавами из термостойкого материала для защиты от электрической дуги, и кожаные перчатки;
- Проведение краткого инструктажа перед началом работ с доведением текущего объёма работ, основных опасностей и мер управления рисками;
- Проверка отсутствия напряжения на оборудовании перед началом его обслуживания, используя второго человека для контроля.

Согласно группе расследования, конкретной ошибкой планирования было то, что в пакете рабочих документов отсутствовала оценка опасностей, связанных с изменением условий выполнения работ с субботы на воскресенье, когда РУ перешло из состояния полного обесточивания к частично под напряжением. В итоге была упущена возможность

выявить необходимость в дополнительном физическом барьере для определения границ обесточенной секции шин А с целью исключения или уменьшения вероятности ошибки человека, которая привела к травме электрослесаря Е1.

#### ***F4. Выполнение работ с соблюдением мер управления рисками***

Процедуры планирования содержат требования в области электробезопасности к содержанию инструктажей перед началом работ, включая следующие вопросы:

- Какие методы или правила должны соблюдаться при выполнении (например, партнёрский контроль или наблюдатель за соблюдением электробезопасности)?
- Какие специальные инструменты или оборудование должны использоваться при выполнении (например, для проверки отсутствия напряжения)?
- Какие особые меры предосторожности требуются в соответствии с условиями выполнения (например, наличие части оборудования под напряжением)?
- Какие СИЗ необходимо использовать?
- Каким образом могут быть допущены ошибки при выполнении?
- Какие самые негативные последствия могут произойти?

В ходе расследования группа не смогла подтвердить, задавались и обсуждались ли эти вопросы во время инструктажа перед началом работ утром 3 мая.

Обобщённый характер планирования работ означал, что пакет рабочей документации не рассматривал и не предоставлял конкретную информацию по опасностям на уровне заданий и мерам управления рисками при выполнении работ с частично запитанными секциями шин РУ. При том, что электромонтёрам была предоставлена строгая и детальная процедура переключений для подачи напряжения на секции С и В вечером в воскресенье, в рабочей документации для электрослесарей отсутствовал уровень детализации действий, который бы учитывал опасности, связанные с изменением рабочей конфигурации секций шин РУ.

Один и тот же пакет документации использовался электрослесарями для выполнения работ в субботу и воскресенье. В этом пакете не было определено повышенной опасности, связанной с продолжением работы в воскресенье, когда часть РУ находилась под напряжением. Эта опасность не была распознана или рассмотрена в ходе планирования, поэтому никаких дополнительных мер управления рисками для предотвращения человеческой ошибки не было разработано и реализовано.

Группа по расследованию выяснила, что перед началом работ утром 3 мая во время инструктажа никто не высказался о возможности проникновения и выполнения операций в ячейке, находящейся под напряжением. Краткий инструктаж провел мастер-электрослесарь Е3 в присутствии ответственного руководителя работ – старшего мастера-

электрослесаря Е9. Когда электрослесарь Е1 вошёл в ячейку 17 (см. рисунок 2), Е9 находился в здании диспетчерского пункта и оформлял документы по выполнению работ ПТО на РУ. В это время Е3, выполняющий функции оперативного контроля за выполнением работ как ПТО-2, так и ПТО-5, стоял у западного выхода РУ. Электромонтёр Е5, в функции которого входила проверка отсутствия напряжения по запросам электрослесарей, располагался у восточного выхода РУ. Все остальные были заняты своими задачами и не заметили, как Е1 открыл дверь и вошёл внутрь ячейки 17 секции шин В, находящейся под напряжением 13.8 кВ.

Также было установлено, что электрослесарь Е1 работал в бейсболке, вместо каски, без защитных очков, в нитриловых перчатках вместо кожаных, и с закатанными рукавами защитной рубашки. Группа по расследованию получила доказательства, что электрослесарь Е1 был не последним, кто не использовал установленные СИЗ.

Согласно данным расследования, проверка отсутствия напряжения не была выполнена Е1. В ходе интервью несколько электрослесарей заявили, что они проводили такую проверку, чтобы удовлетворить свои собственные опасения в отношении электробезопасности. Но документально подтвердить их слова было невозможно, поскольку отсутствовала официальная процедура отслеживания выполнения конкретных заданий. Проверка отсутствия напряжения для каждой ячейки требовалась как профессиональной подготовкой электриков, так и действующей процедурой.

В ходе расследования было установлено, что одновременное выполнение ПТО-2 и ПТО-5 привело к загромождению узкого коридора РУ выключателями секции шин А, специальным оборудованием и инструментами для выполнения ВИ выключателей, а также увеличению числа работающего персонала в ограниченном пространстве. Всё это могло создать условия, способствующие принятию Е1 решения открыть ячейку 17 и работать на шине, находящейся под напряжением. Никто не обратил на это внимание и не остановил его. Около 10 минут дверь в ячейку 17 была открыта и Е1 беспрепятственно находился в ней, пока не произошла вспышка дуги.

Кроме этого, из-за опасности высокого напряжения, границы зоны ВИ выключателей были обозначены жёлтой сигнальной лентой (см. рисунок 2). Группа по расследованию пришла к выводу, что расположение жёлтой предупреждающей ленты между ячейками 16 и 17 секции В могло дать сбивающий с толку визуальный сигнал, повлиявший на решение Е1 работать в ячейке 17.

Процедуры LANL требуют обратной связи по результатам выполнения работ, чтобы помочь улучшить процесс их планирования. Группа по расследованию выявила предыдущие события, связанные с электробезопасностью, и определила, что данный несчастный случай можно было бы предотвратить, если бы на основании извлечённых из этих событий уроков были приняты корректирующие меры. Более подробно это рассмотрено при анализе опыта эксплуатации.

### **Анализ опыта эксплуатации (предыдущие события и инциденты)**

Группа проанализировала прошлый опыт LANL, связанный с безопасностью при эксплуатации электрооборудования, включая анализ самооценок, извлечённые уроки из внутренних событий, а также из отчётов, предоставленных DOE. Анализ данных позволил сгруппировать все предвестники расследуемого инцидента (во многом будущие причинные факторы) в восемь категорий:

1. Не привлечение специалистов в конкретной области к определению объёма и планированию работ;
2. Недостатки соблюдения установленных норм и правил при выполнении работ;
3. Недостатки определение и доведения функций и обязанностей до исполнителей;
4. Недостатки в планировании работ, связанные с анализом опасностей, разработкой и реализацией мер управления рисками (привлечение дополнительных лиц для контроля выполнения работ; применение физических мер управления рисками или заграждений, предупредительных знаков для исключения контакта работников с источниками электроэнергии);
5. Не информирование персонала об условиях выполнения работы (инструктажи перед началом работы отсутствуют или ненадлежащие);
6. Изменение запланированных условий выполнения работы и факторы, отвлекающие исполнителей и оперативного руководителя;
7. Выполнение работ за пределами пакета рабочей документации или мер по управлению рисками;
8. Недостатки мониторинга и оценки рабочих практик (обратная связь по результатам выполнения работ).

На основании извлечённых уроков LANL были разработаны многочисленные корректирующие меры и планы по улучшению. Расследование инцидента на подстанции TA-53 показало, что принятые LANL корректирующие меры и планы по улучшению оказались крайне неэффективными. Многие причинные факторы, выделенные ранее на основании самооценок, внутренних событий и отчётов DOE, не были до конца устранены и способствовали возникновению несчастного случая.

## **Анализ роли человеческого фактора в инциденте**

Бригада электриков была собрана для выполнения запланированных 28 часов сверхурочных работ по ПТО-2 и ПТО-5 в выходные дни 2 и 3 мая после 40-часовой рабочей недели. Привлечение персонала к сверхурочным работам было оформлено в соответствии с внутренними документами LANL.

Рабочий пакет документации был сформирован на основе типовых пакетов документации для ПТО-2 и ПТО-5, разработанных в обобщённом виде, без детализации действий и операций на уровне заданий. В нём не были отражены опасности и меры управления рисками, связанные с подачей напряжения на секции шин С и В вечером 2 мая, которые могли бы предотвратить вход электрослесаря Е1 в ячейку 17 секции шин В.

Работы по ПТО-2 и ПТО-5 впервые выполнялись одновременно, в небольшом рабочем пространстве РУ, что также не было учтено в пакете рабочей документации с точки зрения негативных воздействий и потенциальных опасностей. В интервью в ходе расследования несколько членов бригады отметили, что одновременная работа по двум ПТО была необычной и способствовала большому скоплению людей и оборудования на рабочих местах (температура и влажность в помещениях РУ была в пределах нормы).

Со слов членов бригады, после 14 часов работы в субботу они хорошо отдохнули в гостинице и не чувствовали усталость после возвращения на работу 3 мая в 6:30. Значительный объём работ, выполненный в предыдущий день, вселял в них уверенность, что в воскресенье они смогут завершить все работы пораньше. В интервью члены бригады отметили, что Е1 не хотел, чтобы работы затянулись, поскольку у него были личные планы на вечер 3 мая.

Во время краткого инструктажа перед началом работ, электрослесарь Е1 (с большим опытом работы на РУ и по ПТО-2, ПТО-5) поинтересовался, выполнено ли дополнительное защитное заземление трансформатора ТР-1? Члены бригады согласились, что такая дополнительная мера повысит безопасность работ. Было решено, что заземление выполнит электромонтёр Е5 под наблюдением Е1.

В ходе интервью с членами бригады, группа по расследованию установила, что некоторые из них чувствовали обеспокоенность по поводу подачи напряжения на часть оборудования РУ, но не высказали это вслух во время краткого инструктажа перед началом работ в воскресенье утром. Другие члены бригады, напротив, отметили, что работа в непосредственной близости от ячеек под напряжением является обычной для них практикой. При этом участники предыдущих ПТО на РУ заявили, что это было в первый раз, когда они работали одновременно по двум ПТО. И ранее очистка шин ячеек по ПТО-5 проводилась при полном обесточивании РУ.

Группа по расследованию также установила, что у электромонтёров является обычной практикой работать с бирками "Граница допуска" для разграничения оборудования под напряжением и обесточенного. Электрослесари были обучены этой процедуре, но на практике имели дело с системой "Блокировка/Вывешивание предупреждающих бирок" (Lockout/Tagout или LOTO), в которой устанавливается барьер для каждого источника энергии или вывешиваются сигнальные ленты для ограждения опасной зоны. В итоге Е1 мог рассматривать ячейки до жёлтой сигнальной ленты как "безопасную" зону для выполнения работ.

Для отслеживания хода выполнения работ 2 и 3 мая в бригаде отсутствовала официальная процедура, поэтому члены бригады использовали свою неформальную систему. Кусок синей изолянтной ленты на двери ячейки обозначал, что её очистка выполнена (ПТО-5). Кусок красной изолянтной ленты на двери ячейки свидетельствовал, что ВИ выключателя проведены (ПТО-2). Ячейка 17 должна была быть помечена только синей изолянтной лентой, поскольку в ней не было выключателя и она была очищена в субботу. Фотографии на месте инцидента и последующая проверка группы по расследованию показали, что 3 мая на двери ячейки 17 отсутствовала какая-либо изолянтная лента.

В ходе выполнения работ 3 мая на РУ было задействовано 9 человек (ответственный руководитель работ Е9 находился в здании диспетчерского пункта). Кроме этого, в узком коридоре, не более 2 м в ширину, располагались три выключателя из ячеек секции шин А, оборудование и инструменты для проведения ВИ, а также оборудование РУ (см. рисунок 2). Чтобы ограничить допуск работников в зону проведения ВИ выключателей, в качестве барьера были использованы жёлтые сигнальные ленты. О назначении этих лент члены бригады были проинформированы в ходе краткого инструктажа перед началом работ.

В ходе интервью группа по расследованию выяснила, что среди членов бригады не было чёткого представления относительно того, следует ли проводить проверку отсутствия напряжения для каждой ячейки. Некоторые электрослесари не знали, кто должен выполнять проверку (эти функции были возложены на электромонтёра Е5). Показания членов бригады указывают, что некоторые ячейки секции шин А не были проверены.

Никто из членов бригады не заметил как Е1 вошел в ячейку 17. Электрослесарь Е6 (с большим опытом работы на РУ и по ПТО-2, ПТО-5) вспомнил, что видел открытую дверь ячейки 17, когда проходил мимо непосредственно перед инцидентом. Электрослесарь Е4 также подтвердил, что дверь ячейки 17 была открыта незадолго до инцидента. Никто из них не мог вспомнить, видел ли он кого-то в ней.

Несколько опрошенных членов бригады сообщили, что после вспышки дуги, когда E1 выбросило в коридор, он смог сказать, что не ожидал, что ячейка будет под напряжением. E1 характеризовался его коллегами как трудолюбивый, старательный и целеустремленный работник.

После инцидента тест на наркотики или алкоголь не проводился, как того требовала процедура LANL. Было признано, что приоритетом являлось лечение пострадавшего работника, но другие члены бригады имели возможность пройти тестирование.

В ходе всего периода расследования группа JAIT не смогла провести интервью с потерпевшим. После полученных ожогов он продолжал находиться в стабильно тяжёлом состоянии в ожоговом центре.

Проанализировав данные в области человеческого фактора, группа по расследованию выделила следующие предвестники ошибок в деятельности персонала 2 и 3 мая, согласно модели TWIN [12, 13]:

*(T) Требования задачи*

– Факторы времени

- Необходимо запитать секции шин С и В РУ вечером в субботу 2 мая;
- Необходимо закончить все работы по ПТО-2 и ПТО-5 к вечеру воскресенья 3 мая;
- Можно закончить все работы раньше в воскресенье 3 мая.

– Повторяющиеся действия

- Очистка шин ячейки, маркировка ее синей изолянтной, переход на ячейку без маркировки.

– Необратимые действия (критические шаги)

- Распыление очистителя между шиной и заземлённой стенкой ячейки.

– Интерпретация требований

- Чистить ячейки только с "восточной" стороны от бирки "Граница доступа", висящей на ячейке 18;
- Ячейки с "западной" стороны РУ от бирки "Граница доступа", висящей на ячейке 18, находятся под напряжением.

*(W) Условия выполнения работ*

– Изменения/отклонения от обычных условий

- Выполнение двух ПТО одновременно;
- Работа рядом с оборудованием, к которому вновь подано напряжение;
- Выполнение ПТО-5 без обесточивания оборудования на весь период работ.

- Вводящие в заблуждение сигналы или меры управления рисками
  - Синяя изоленга, означавшая выполнение ПТО-5, отсутствовала на двери ячейки 17, которая находилась под напряжением;
  - Бирки "Граница допуска" были привычны для электромонтёров и редко применялись в практике электрослесарей;
  - Жёлтая сигнальная лента, привычная для электрослесарей, была протянута поперек коридора РУ непосредственно перед ячейкой 17 в качестве границы зоны ВИ.
- Неожиданные состояния оборудования
  - На двери ячейки 17 не было синей изоленги, указывающей, что она была очищена, таким образом подразумевалось, что она нуждается в очистке и обесточена.

*(I) Индивидуальные особенности*

- Важные, отвлекающие события в жизни
  - Субъективное давление времени у Е1 в ожидании чего-то важного для него в воскресенье вечером (отвлечение внимания от задачи, выполнение действий на уровне автоматизма, без осознанного контроля).
- "Небезопасные" аттитюды (отношения)
  - Несоблюдение требований по СИЗ.
- Болезнь или усталость
  - 14-часовой день в субботу 2 мая после 40-часовой рабочей недели.

*(N) Природа человека*

- Предположения
  - Если ячейка не имеет синей изоленги на двери, ее нужно почистить;
  - Если ячейка нуждается в очистке, она обесточена.

## **Причинные факторы несчастного случая**

На основании выявленных фактов и результатов анализа, группа по расследованию определила следующие причины несчастного случая.

*Непосредственная причина.* Распыление электрослесарем Е1 чистящего средства в воздушный зазор между шиной и заземлённым корпусом, что повлекло за собой короткое замыкание и вспышку дуги.

*Способствующие причины.* Группа по расследованию объединила 34 способствующих причины в пять категорий, аналогичных основным функциям ISM:

1. Объём работ на уровне задач не был должным образом определен:



- Типовые пакеты рабочей документации по ПТО-2 и ПТО-5 содержали относительно простые виды работ, но которые не были описаны на уровне заданий, чтобы обеспечить максимальную гибкость выполнения;
- В процессе планирования вопросы объединения работ по ПТО и подачи напряжения на часть оборудования РУ не были рассмотрены;
- Специалисты по планированию полагали, что успешное выполнение в прошлом ПТО-2 и ПТО-5 не требует внесения существенных изменений ни в описание работ, ни в перечень опасностей и мер управления рисками.

2. Недостатки в процессе анализа опасностей привели к тому, что некоторые угрозы не были выявлены и проанализированы:

- Не были рассмотрены опасности одновременного выполнения двух ПТО в ограниченном рабочем пространстве, а также изменения конфигурации РУ и подачи напряжения на часть оборудования;
- Не была предусмотрена официальная процедура отслеживания выполнения работ.

3. Меры управления рисками не были эффективно разработаны и реализованы, чтобы гарантировать безопасность выполнения работ:

- Жёлтая сигнальная лента, использованная для ограничения зоны ВИ выключателей, могла служить ложной визуальной подсказкой границы между запитанным и отключенным оборудованием;
- Отсутствие официальной процедуры отслеживания выполнения работ было компенсировано неформальной системой маркировки ячеек цветными полосками изоленды.

4. Работа не была выполнена с соблюдением мер управления рисками, как предусмотрено руководством и специалистами по планированию работ:

- Перегруженность рабочего пространства оборудованием и инструментами затрудняла оперативный контроль выполнения работ через регулярные обходы рабочих мест (во время инцидента мастер-электрослесарь Е3 находился у западного выхода РУ, а электромонтёр Е5 - у восточного);
- Проверка отсутствия напряжения не рассматривалась как обязательная, если ячейка не имела на двери синюю изоленду ("очистка выполнена").

5. Обратная связь и извлечённые уроки не были применены:

- Многочисленные уроки, извлечённые из предшествующих инцидентов, несчастных случаев, представленных во внутренних событиях LANL или отчётах DOE, не были использованы.

*Коренная причина.* Ненадлежащий процесс разработки и реализации мер управления рисками:

- После принятия решения о подаче напряжения на секции С и В РУ в субботу вечером 2 мая, не был выполнен анализ опасностей, связанных с изменением в конфигурации РУ, и не разработаны необходимые меры управления рисками. В качестве единственных барьеров, препятствующих ошибочному проникновению в ячейки, находящиеся под напряжением, использовались краткий инструктаж перед началом работ и небольшая бирка "Граница допуска". Более надёжные физические барьеры (например, ограждение опасной зоны, использование замков на ячейках) могли бы предотвратить человеческую ошибку, исключив контакт с опасным источником энергии.

### **Корректирующие меры**

Группа по расследованию сформулировала 13 корректирующих мер по результатам анализа системы ISM, опыта эксплуатации и человеческого фактора.

#### *F1. Определение объёма работ*

1. Руководству необходимо усилить требования в отношении определения объёма и планирования выполнения работ, а также анализа опасностей на уровне заданий. Эти требования следует поддерживать и регулярно оценивать.

2. Руководство должно способствовать активному участию и заинтересованности квалифицированного персонала в определении объёма и планировании выполнения работ.

#### *F2. Анализ опасностей*

3. Руководству необходимо тщательно оценивать изменяющиеся условия при использовании типовых пакетов рабочей документации во время процесса планирования, чтобы обеспечить соответствие мер управления рисками фактическим условиям на рабочей площадке.

#### *F3. Разработка и реализация мер управления рисками*

4. Руководство должно обеспечить надёжные, долговечные и видимые физические барьеры и предупредительные знаки, расположенные надлежащим образом и точно отражающие текущие условия работы, состояние оборудования и опасности для обеспечения труда безопасности работников.

#### *F4. Выполнение работ с соблюдением мер управления рисками*

5. Руководство должно усилить требования относительно строгости выполнения работ на уровне задания в рамках мер управления рисками. Эти требования следует регулярно подкреплять и оценивать.

6. Руководству необходимо усиливать и уточнять соблюдение требований по проверке отсутствия напряжения в ходе работ на электрооборудовании для всех уровней организации.

7. Руководству необходимо усилить инструктажи перед началом работ или при возникновении значительных изменений, чтобы обеспечить вовлечённость работников, концентрацию их внимания и полное понимание опасностей при выполнении работ и важных мер управления рисками.

8. Руководство должно обеспечить поощрение и признание работников за их активную роль в обеспечении собственной или командной безопасности труда и соблюдения правил выполнения работ.

9. Руководство и непосредственные оперативные руководители должны усиливать и уточнять на всех уровнях организации требования в отношении использования СИЗ и методов выполнения работ при обслуживании электрооборудования.

*F5. Обеспечение обратной связи и улучшений (Опыт эксплуатации)*

10. Руководству необходимо улучшить свои возможности реализации и проверки эффективности корректирующих мер, разработанных на основе самооценок и анализа предыдущих внутренних событий и внешних отчётов.

*Человеческий фактор*

11. Руководству необходимо установить единообразное и строгое соблюдение требований безопасности труда при выполнении работ с участием смешанных рабочих групп (например, с различным опытом и квалификацией).

12. Руководству необходимо эффективно применять методы предотвращения ошибок в работе человека [12, 14] при планировании работ и анализе опасностей.

13. Руководству необходимо проанализировать использование неформальных методов и практик выполнения работ в контексте потенциального воздействия на эффективность мер управления рисками и обеспечение безопасности.

Во многом предложенные группой расследования корректирующие меры совпадают с теми, которые LANL определила для себя по результатам анализа предыдущего опыта эксплуатации. Группа JAIT пришла к выводу, что реализация LANL этих мер оказалась, в целом, не эффективной. Причинные факторы, которые должны были быть устранены, вновь проявили себя в инциденте на РУ подстанции ТА-53 3 мая 2015 года.

Группа по расследованию установила, что LANL реализована комплексная система управления безопасностью, с чёткими функциями (требованиями) и принципами в области обеспечения безопасности. Разработанные LANL политики, программы, методы, процедуры полностью отвечают функциям и принципам ISMS, которые опираются на достижения в области культуры безопасности и опыт высоконадёжных организаций. Почему же тогда инциденты, подобные несчастному случаю на РУ подстанции ТА-53, имеют место быть? И здесь мы должны обратиться к трём базовым принципам, которые играют критически важную роль в долгосрочном успехе программ безопасности, требующих изменений в культуре организации [1, 6, 15, 16].

*1. Приверженность и лидерство руководства в вопросах безопасности.* Проведённое расследование позволяет выделить следующие недостатки приверженности и лидерства руководства LANL в вопросах безопасности:

- Руководство не обеспечивало реализацию корректирующих мер по результатам анализа опыта эксплуатации предыдущих событий и инцидентов, что требует обязательный мониторинг и оценку их эффективности (с предоставлением данных для рассмотрения руководству);
- Руководство не обеспечивало мониторинг выполнения работ (включая личные посещения и наблюдения) для выявления проблем и оценки неформальных методов и рабочих практик с позиций влияния их на безопасность;
- Руководство не обеспечивало контроль изменений при планировании работ с целью анализа возможных опасностей и реализацией соответствующих мер управления рисками (эффективность программы управления изменениями);
- Руководство не обеспечивало разработку и реализацию мер управления рисками во время работ в соответствии с принятой LANL иерархией мер (инженерно-технические, административные, СИЗ), когда физические барьеры компенсировались опытом и квалификацией исполнителей;
- Руководство не способствовало активному участию и заинтересованности квалифицированного персонала в рассмотрении и решении вопросов безопасности при определении объёма и планировании выполнения работ;
- Руководство не обеспечивало поощрение и признание работников за их активную роль в обеспечении безопасности труда и соблюдении норм и правил при выполнении работ.

*2. Активность и вовлечённость персонала в вопросы безопасности.* Данные расследования указывают на следующие признаки недостаточной активности и вовлечённости персонала LANL в вопросы безопасности:

- Квалифицированный персонал с опытом работы не принимал активного участия в определении объёма и планировании выполнения работ, оценке опасностей и разработке мер управления рисками;
- Персонал не получал поощрений и признаний за свою активную роль в обеспечении безопасности труда и соблюдении норм и правил выполнения работ;
- Приверженность и лидерство руководства в вопросах безопасности слабо демонстрировалось на рабочих местах.

3. *Атмосфера открытости и доверия.* Данный принцип предполагает, что в организации установлен высокий уровень доверия, существует свободный поток информации, в котором поднимаются и рассматриваются проблемные вопросы и персонал информируется о мерах, предпринятых в ответ на высказанные озабоченности [16]. Во время краткого инструктажа утром в воскресенье 3 мая некоторые электрослесари испытывали обеспокоенность в отношении подачи напряжения на секции шин С и В РУ. Но никто не высказал их вслух (что было бы проявлением взвешенной критической позиции), не попытался обсудить. Группа по расследованию специально не проанализировала эти свидетельства членов бригады, но они могут указывать на недостатки атмосферы открытости и доверия в LANL, когда любые вопросы безопасности можно поднимать без опасений, страха, боязни быть осмеянным, получить в свой адрес нелицеприятные замечания или просто быть проигнорированным, когда критическая позиция поддерживается и поощряется оперативным руководителем и группой.

Несоблюдение принципов приверженности руководства вопросам безопасности, вовлечённости персонала в вопросы безопасности, атмосферы открытости и доверия в вопросах безопасности создаёт серьёзные барьеры для формирования и поддержания культуры, необходимой для эффективного функционирования системы планирования работ, анализа опасностей, определения мер управления рисками и выполнения работ. И, в конечном счёте, создаёт условия для подобных инцидентов в будущем.

## **Выводы**

1. Несчастный случай, который имел место на РУ подстанции TA-53 LANL 3 мая 2015 года служит ярким примером базового принципа современного подхода к повышению надёжности деятельности человека: "Людям свойственно ошибаться, и даже самые лучшие специалисты допускают ошибки" [1, 6, 17, 18]. Электрослесарь Е1 был опытным, квалифицированным специалистом, трудолюбивым, старательным, целеустремленным работником, и допустил ошибку в задаче, которую уже не раз выполнял в своей жизни.

2. Согласно результатам расследования инцидента, принцип "Людям свойственно ошибаться" не нашел своё отражение при планировании работ на РУ подстанции TA-53 в

воскресенье 3 мая. Были проигнорированы изменения в конфигурации РУ и опасности, обусловленные подачей питания на секции шин С и В. В качестве мер управления рисками были предложены не физические барьеры, а опыт и квалификация персонала. Консервативный подход в этом случае требовал учёта возможной человеческой ошибки.

3. Расследование, выполненное группой JAIT, в полной мере опиралось на принцип "Людам свойственно ошибаться". Для членов группы изначально важно было определить не виновников инцидента, а причины, которые к нему привели. Почему процессы, программы, процедуры, призванные обеспечить безопасность работ, не выявили опасности, связанные с подачей напряжения на часть оборудования РУ, не позволили разработать и реализовать меры управления рисками, которые могли бы предупредить ошибку человека? Почему опыт эксплуатации, в котором были выявлены предвестники расследуемого инцидента, не был учтён при планировании и выполнении работ на РУ подстанции ТА-53?

4. Важным уроком из инцидента на РУ подстанции ТА-53 служит тот факт, что несоблюдение принципов приверженности руководства вопросам безопасности, вовлечённости персонала в вопросы безопасности, атмосферы открытости и доверия в вопросах безопасности создаёт серьёзные барьеры для формирования и поддержания культуры, необходимой для эффективного функционирования системы планирования работ, анализа опасностей, определения мер управления рисками и выполнения работ. В этом случае мы имеем все предпосылки для повторения подобных инцидентов в будущем.

### **Список литературы**

1. *Машин, В. А.* Формирование и развитие культуры безопасности на атомных станциях [Текст] / В. А. Машин // Электрические станции. – 2016. – № 8. – С. 2 – 9.

2. *Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья.* Требования [Текст]: ГОСТ Р 54934-2012/OHSAS 18001:2007. – М.: Стандартинформ. – 2012. – 27 с.

3. *Arc Flash Accident at Los Alamos National Laboratories Technical Area 53* [Electronic resource]: Operating Experience Summary, Issue Number 2016-01. – Office of Environment, Health, Safety and Security. U.S. Department of Energy. – January 14, 2016. – 9 p. – ([https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/01/f28/OES\\_2016-01.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/01/f28/OES_2016-01.pdf)).

4. *TA-53 Arc-Flash Accident.* Joint Accident Investigation Team Report [Electronic resource]: Los Alamos National Laboratory, National Nuclear Security Administration, U.S. Department of Energy. – July 14, 2015. – 107 p. –

([https://engineering.llnl.gov/content/assets/docs/efcog/7\\_9\\_15\\_TA\\_53\\_FinalReport.pdf](https://engineering.llnl.gov/content/assets/docs/efcog/7_9_15_TA_53_FinalReport.pdf)).

5. *Анализ коренных причин инцидента на ядерной установке: справочное руководство* [Текст]: IAEA-TECDOC-1756. – МАГАТЭ. – 2015. – 101 с.
6. *Integrated Safety Management System Guide* [Electronic resource]: DOE G 450.4-1C. – U.S. Department of Energy. – 2011. – 104 p. –  
([https://www.directives.doe.gov/directives-documents/400-series/0450.4-EGuide-1c/@\\_@images/file](https://www.directives.doe.gov/directives-documents/400-series/0450.4-EGuide-1c/@_@images/file)).
7. *Integrated Safety Management System Policy* [Electronic resource]: DOE P 450.4A. – U.S. Department of Energy. – 2011. – 3 p. –  
([https://www.directives.doe.gov/directives-documents/400-series/0450.4-APolicy-a/@\\_@images/file](https://www.directives.doe.gov/directives-documents/400-series/0450.4-APolicy-a/@_@images/file)).
8. *Машин, В. А.* Культура безопасности: система учёта опыта эксплуатации [Текст] / В. А. Машин // *Электрические станции.* – 2017. – № 7. – С. 2 – 13.
9. *Машин, В. А.* Культура безопасности: система учёта человеческого фактора [Текст] / В. А. Машин // *Электрические станции.* – 2017. – № 8. – С. 11 – 22.
10. *Lewis, P. S.* TA-53 Arc Flash Accident [Electronic resource]: Los Alamos National Laboratory. – 2015 DOE Accelerator Safety Workshop. – Brookhaven, NY. – 2015. – September. – 18 p. –  
([https://indico.bnl.gov/event/1041/contributions/205/attachments/186/198/Lewis\\_TA53-ArcFlash-ASW15-LAUR-15-26880-Lewis.pdf](https://indico.bnl.gov/event/1041/contributions/205/attachments/186/198/Lewis_TA53-ArcFlash-ASW15-LAUR-15-26880-Lewis.pdf)).
11. *Надёжность* в технике. Анализ опасности и работоспособности (HAZOP) [Текст]: ГОСТ Р 27.012-2019. – М.: Стандартинформ. – 2019. – 58 с.
12. *Машин, В. А.* Повышение эффективности деятельности персонала АЭС [Текст] / В. А. Машин // *Электрические станции.* – 2013. – № 5. – С. 2 – 10.
13. *Human Performance Improvement Handbook. Volume 1: Concepts and Principles.* [Text]: DOE-HDBK-1028-2009. – U.S. Department of Energy. – 2009. – 175 p.
14. *Машин, В. А.* Культура безопасности: методы предупреждения неверных действий человека [Текст] / В. А. Машин // *Электрические станции.* – 2018. – № 2. – С. 2 – 12.
15. *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.
16. *Машин, В. А.* Культура безопасности: принцип атмосферы доверия в организации [Текст] / В. А. Машин // *Электрические станции.* – 2018. – № 9. – С. 2 – 14.
17. *Excellence in Human Performance* [Text]: INPO. – 1997. – September. – 24 p.

18. *Принципы* эффективной работы персонала [Текст]: GL 2002-02. – ВАО АЭС. – 2003.  
– 33 с.