

УДК 614.844

Шевченко В. В., Петренко Н. Я.**О ПОВЫШЕНИИ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК ПОЖАРОТУШЕНИЯ НА БЛОКАХ АЭС**

Современные потребности человечества в энергии составляют 5303 млн т. н. э. в год, и удваиваются каждые 25 лет, т. е. прирост составляет 3–5 % в год [1]. Пропорционально возрастает и потребление электроэнергии. Обеспечить эти потребности без ядерной энергетики невозможно [2]. Однако технические системы большой сложности и мощности, к которым относятся объекты ядерной энергетики, характеризуются высоким риском аварий, опасных для людей и окружающей среды и приводящих к катастрофическим последствиям. Это показали аварии на АЭС в Кыштыме (Южный Урал, СССР, 1957 г.), на «Три-Майл-Айленд» (США, 1979 г.), на Чернобыльской АЭС (СССР, 1986 г.) и на АЭС Фукусима-1 (Япония, 2011 г.). Эти аварии сформировали у значительной части населения планеты устойчивое негативное отношение к атомной энергетике, привели к отказу от строительства ряда станций, консервации недостроенных блоков и досрочному выведению из эксплуатации работавших. От ядерной энергетики отказываются как аграрные, так и индустриально развитые страны. Уже прекращена работа всех АЭС в Италии и Казахстане. По пути отказа от ядерной энергетики идут Германия, Швейцария, Швеция, Австрия [3]. Но в то же время строят свои первые АЭС Беларусь, Бангладеш, Турция, ОАЭ. Т. е. в отношении использования ядерной энергии разные страны придерживаются разных взглядов, но эта политика может меняться в зависимости от обстоятельств [4, 5]. Но следует признать, что будущее мировой и национальной энергетики связано с дальнейшим увеличением количества и мощности АЭС, которые вырабатывают относительно дешевую энергию, снизят скорость глобального потепления, сохраняют ископаемые топлива для будущих поколений, но их эксплуатация требует безусловного соблюдения правил безопасности, установленных МАГАТЭ. Одной из важнейших задач безопасного использования ядерной энергии является снижение аварийности блоков АЭС от настоящего уровня 10^{-6} до 10^{-9} [6]. Для этого, в первую очередь, следует снизить вероятность возникновения пожаров на АЭС, которые являются главным фактором гибели персонала и утраты материальных ценностей станций [7]. Вклад пожаров в частоту повреждения активной зоны реактора равен вкладу от всех других разрушающих факторов вместе взятых, а ущерб от пожаров превышает 60% общего ущерба от всех аварий и неполадок на АЭС. Следует помнить, что по расчетам специалистов МАГАТЭ разрушение из-за пожара одного блока АЭС мощностью 1 млн кВт равно взрыву ядерной бомбы в 1 Мт. Пожары на АЭС приносят прямые убытки (уничтожение имущества станций) и косвенные (простой станций, отрицательное влияние на экологию и здоровье персонала и населения).

Увеличение частоты крупных пожаров на АЭС связывают со старением электрооборудования станций, недостаточной надежностью проведения модернизации [8]. Неудовлетворительное техническое состояние оборудования повышает риск ошибочных действий персонала станций [9]. Для снижения частоты возникновения и уменьшения последствий пожаров необходимо знать причины и характеристики развития предыдущих аварий, эффективность применяемых противопожарных мероприятий отдельно для стадий возникновения, развития, тушения и для послеаварийного периода, табл. 1, [10]. Риски для людей зависят от прочности конструкций, определяются опасностями отравления ядовитыми продуктами горения, получением термических и химических ожогов, возможностью поражения электрическим током, от созданных возможностей эвакуации.

Ядерная опасность может быть снижена за счет повышения надежности реактора, использования ТВЭЛ-ов с лимитом дефектных компонентов, за счет поддержания герметичности

реакторной зоны, зонального дозиметрического контроля, ограничения доступа к ядерному топливу, соблюдения правил обращения с ядерными отходами.

Таблица 1

Частота пожаров на АЭС

Наименование помещения или участка помещения	Вероятность возникновения пожара за год на одно помещение
Помещения управления, контроля и наблюдения	$2,6 \cdot 10^{-3}$
Кабельные помещения (каналы)	$1,0 \cdot 10^{-2}$
Помещения установки дизель-генераторов	$2,0 \cdot 10^{-2}$
Емкости для хранения газо-смазочных материалов	$1,0 \cdot 10^{-2}$
Турбинное отделение, машинный зал	$1,8 \cdot 10^{-2}$
Помещения вспомогательных установок реактора	$4,1 \cdot 10^{-2}$

Из горючих материалов, по данным статистики пожаров на АЭС, наиболее опасными являются масла и нефтепродукты, электрооборудование (ЭО), пластмассы, дерево, изоляция кабелей, другие горючие жидкости и горючие газы (водород) [11]. В машинных залах АЭС горючие материалы (турбинное масло и водород) находятся в герметичных оболочках, и их взаимодействие с кислородом воздуха возможно только при разгерметизации. При таких пожарах горит разлитое и фонтанирующее масло, как факел горит водород. Обычно возникновению пожаров в машинных залах АЭС предшествуют аварии турбогенераторов (ТГ) [8, 12]. Следствием подобных пожаров, как правило, является обрушение металлических ферм и покрытий на оборудование, что, в свою очередь, приводит к нарушению герметичности маслосистем и к образованию новых очагов горения. Пожары в машинных залах АЭС и ТЭС развивается аналогично. На рис. 1 приведено фото пожара на Углегорской ТЭС (29.03.2017 г.) и вид блока ТЭС после пожара.



Рис. 1. Фото пожара на Углегорской ТЭС и вид блока ТЭС после пожара

Для снижения последствий пожаров маслоохладители, маслонасосы системы маслоподачи и регулирования турбины, маслонасосы уплотнений вала и гидроподъема ротора генератора, демпферные баки генератора и турбины оборудуют стационарными установками тушения пожаров распыленной водой с интенсивностью подачи воды $0,06 \div 0,3$ л/с на каждый квадратный метр зоны горения. Наиболее сложными для тушения являются пожары в кабельных сооружениях АЭС, т. к. огонь быстрее распространяется по кабельным каналам (эффект тяги), чем в открытых помещениях. Кроме того, при горении изоляции выделяются токсичные вещества, которые даже после полного тушения опасны для жизни людей и оборудования [10]. Например, хлористый водород в газообразном состоянии вызывает ожоги открытых участков кожи, острое отравление при вдыхании, что существенно затрудняет

поиск очага горения, а после соединения с водяным паром превращается в жидкую соляную кислоту, которая в виде капель оседает на оборудовании и вызывает коррозию металлических поверхностей. Возможная площадь горения кабельных сетей АЭС измеряется десятками и даже сотнями квадратных метров. Поэтому изоляцию кабелей необходимо изготавливать из трудногорючих материалов (например, из кремнийорганической резины), герметизировать стыки вакуум-плотными металлокерамическими изоляторами, а места прохода кабелей через стены следует обрабатывать огнезащитными составами на основе фенолформальдегидных смол, что значительно увеличивают стоимость кабельных сетей. Кабели должны быть проложены в коробах или трубах, при этом кабельные укладки делят на сектора, отделенные друг от друга противопожарными перегородками. Тушение пожара проводится по секторам, и тушение в следующем секторе начинают только после завершения тушения в предыдущем. Между секторами устанавливаются противопожарные перегородки и двери с огнестойкостью не менее 1,5 часов. В общих каналах вентиляции для разграничения воздушного пространства секторов устанавливаются герметичные задвижки. Для легко воспламеняющихся жидкостей и газов предусмотрены механизмы их удаления из очагов горения. Например, масло дизель-генераторов по аварийной процедуре сливается в подземный резервуар за пределами реакторного отделения; система аварийного удаления водорода предусматривает его принудительное (под давлением) удаление и разбавление другими газами до невзрывоопасных концентраций, а также частичное сжигание. Каналы газоудаления выполняются искробезопасными. Дизель-генераторы и расходные баки топлива к ним устанавливаются в углубленных приямках отдельных помещений с металлическим полом, а в каналах маслопроводов и топливопроводов устанавливают огнесдерживающие барьеры.

Такие правила противопожарной безопасности рекомендуются МАГАТЭ для всех станций с реакторами типа ВВЭР. Техническая модернизация противопожарных систем должна обязательно проводиться при продлении сроков эксплуатации АЭС, но, учитывая рекомендательный характер правил МАГАТЭ, возможно, что модернизация не будет проведена, либо будет проведена не полностью. Как показывает анализ пожаров на АЭС [9, 11], обычно принимаемые меры или недостаточны, или малоэффективны. Поэтому необходимо продолжать работы по совершенствованию систем выявления зарождающихся пожаров, систем оповещения и пожаротушения. Поэтому наше исследование, посвященное вопросам повышения надежности систем оповещения и пожаротушения на энергоблоках АЭС Украины за счет модернизации схем пожарной автоматики и, в частности, пожарной сигнализации, актуально.

Системы автоматической пожарной сигнализации энергоблоков АЭС Украины были спроектированы в конце 80-х – начале 90-х годов прошлого века. Они используют автоматические комбинированные (дымовые и тепловые) пожарные извещатели типа ДСП-1 и приемно-контрольные приборы ППС-1. Производство ППС-1 на заводах СССР было прекращено в 80-е годы вследствие их низкого технического уровня (по показателям механической, сейсмической и радиационной стойкости) и несоответствия технических стандартов НАЭК Украины (ГСН В.2.5-13-98, п.п.1.5.10, 1.6.3). Новые датчики ППС-3 и ППС-3М украинского производства имели плохое качество, а приборы производства США, Японии и западноевропейских стран слишком дорогие. Кроме того, полная замена потребует прокладки дополнительных кабелей (до 40 % свыше ранее проложенных) и увеличения объемов строительно-монтажных работ. Также была отмечена электромагнитная несовместимость новых датчиков с прежними элементами систем автоматического обнаружения и тушения пожаров, что приводит к ложным срабатываниям. Ошибочная информация искажает сигналы, поступающие к оперативному персоналу на блочный щит управления (БЩУ). Ложные срабатывания пожарной автоматики снижают бдительность персонала и вызывают недоверие к сигналам о зарождающемся пожаре. Персонал игнорирует сигналы и продолжает работать в условиях включившейся системы пожаротушения. Ряд средств пожаротушения опасен для здоровья людей. Например, при срабатывании углекислотной системы автоматического пожаротушения

концентрация углекислого газа (CO_2) в воздухе увеличивается до 40 %, образуется туман и теряется видимость. При превышении концентрации CO_2 в атмосфере на 3 % у человека начинается одышка, на 10 % – теряется координация движений, при 20 % начинаются судороги. Системы пенного пожаротушения (особенно с фторированными пенообразователями) дорогие и после использования потребуют для перезаправки десятки тысяч долларов.

Анализ результатов исследований многих ученых показал, что вместо двухканальных пожарных датчиков целесообразно использовать адресно-аналоговые 4-канальные датчики, укомплектованные газоанализаторами, лазерной индикацией дыма, термодатчиками и датчиками инфракрасного излучения с выводением сигнала на тепловизор [3, 5, 6, 7, 11, 12]. Такие датчики имеют более высокую помехостойкость и диапазон измеряемых параметров. Модернизацию автоматизированных систем управления противопожарной защитой следует проводить с учетом зонального деления АЭС, с обеспечением дублирования всех каналов распознавания пожара, оповещения, тушения, с использованием автоматических, дистанционных и ручных средств управления. Все новые технические решения должны быть подтверждены аналитическими и/или экспериментальными исследованиями. Наиболее точные результаты могут быть получены при проведении исследований на реальных объектах, но это не всегда возможно из-за технической сложности и стоимости оборудования. Поэтому обычно проводят исследования путем моделирования работы систем.

Модель работы установки пожаротушения для прогнозирования вероятности ее отказа в определенный отрезок времени выполнялась для задвижек каналов водяного пожаротушения, для систем запуска пожарных насосов и систем блокировки вентиляционных каналов. В настоящее время в машинных залах блоков станций используют автоматические установки обнаружения, тушения пожара и установки управления пожарными гидрантами (АУПГ), функциональная схема которых представлена на рис. 2.



Рис. 2. Функциональная схема существующей автоматической установки обнаружения и тушения пожаров в машинном зале электростанции

Из представленной схемы видно, что для определения вероятности безотказной работы существующей системы АУПГ необходимо определить вероятность безотказной работы каждого канала этой схемы: схемы задвижки АУПГ, схемы автоматического пожаротушения и системы вентиляции. На рис. 3 представлена блок-схема расчета надежности АУПГ по трем указанным каналам. На рис. 3 (и далее) использованы следующие обозначения: A_1 – пожарный извещатель; A_2 – (ДСП-1) дистанционная система включения пожарного гидранта; A_3 – (ППС-1) пункт пожарной сигнализации; A_4 – программируемый релейный модуль; A_5 – (БЛУВ) блок управления системой электроснабжения пожарных систем; A_7 – A_9 – (БКЛ № 1–3) блоки обеспечения противопожарной защиты кабельных линий; A_{10} – Ключи дистанционного

управления; A_{11} – Схема включения насоса ПГ; A_{12} – Насос ПГ; A_{13} – Схема блокировки вентиляции; A_{14} – Вентилятор (подача воздуха в помещение); A_{15} – система управления заслонкой АУПГ; A_{16} – система управления оросителем в защищаемом помещении.

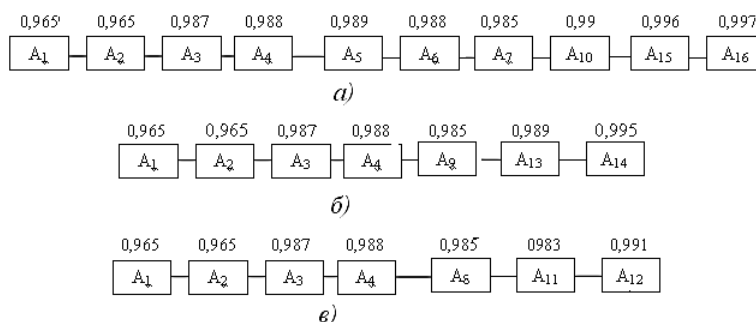


Рис. 3. Блок-схема расчета надежности установленной системы автоматического пожаротушения машинного зала блока электростанции:

а – схема расчета вероятности безотказной работы схемы задвижки АУПГ; б – схема расчета вероятности безотказной работы схемы автоматического пожаротушения; в – схема расчета вероятности безотказной работы системы вентиляции

В соответствии с представленной схемой, вероятность безотказной работы схемы задвижки водяного пожаротушения может быть рассчитана:

$$\begin{aligned} \lambda_{gv} &= A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot A_6 \cdot A_7 \cdot A_{10} \cdot A_{15} \cdot A_{16} = \\ &= 0,965 \cdot 0,965 \cdot 0,987 \cdot 0,988 \cdot 0,989 \cdot 0,988 \cdot 0,985 \cdot 0,99 \cdot 0,996 \cdot 0,997 = 0,859. \end{aligned}$$

Аналогично может быть рассчитана вероятность безотказной работы схемы автоматического пожаротушения и системы вентиляции машинного зала: $\lambda_{af} = 0,871$ и $\lambda_{vent} = 0,878$, соответственно. Вероятность безотказной работы пожарной системы машинного блока станции, установленной в настоящее время, может быть определена:

$$\lambda_{stat} = \lambda_{gv} \cdot \lambda_{af} \cdot \lambda_{vent} = 0,859 \cdot 0,871 \cdot 0,878 = 0,657.$$

Для повышения надежности системы автоматического пожаротушения и системы вентиляции важно, чтобы сигналы о неисправности шлейфов сигнализации или извещателей, включенных в шлейф, не препятствовали формированию сигналов о пожаре; чтобы извещатели самостоятельно, без запросов выходили на связь с системами контроля и управления при возникновении признаков пожара и не конфликтовали друг с другом при одновременной передаче сигнала от разных каналов. Поэтому своевременное обнаружение и тушение пожара на станции практически невозможно организовать, используя только один тип извещателей или один вид средств тушения. Необходимо сочетание как минимум двух типов извещателей, реагирующих на разные проявления пожара (дым и излучения пламени, дым и повышение температуры), и минимум двух огнетушащих веществ (распыленная вода и газ, пена и газ). Дублирование повышает надежность, которая в случае с системами пожаротушения означает безотказность, долговечность и ремонтпригодность [9, 12]. В предлагаемой схеме организации системы автоматического пожаротушения и системы вентиляции машинного зала предлагается применить именно прием дублирования каналов автоматической системы пожаротушения и сигнализации наиболее пожароопасных помещений: реакторного, машинного отделения и специального корпуса, помещений БЩУ и кабельных каналов, рис. 4.

Расчет для предлагаемой схемы показал, что для предлагаемой схемы пожарной системы машинного блока станции вероятность безотказной работы будет равна:

$$\lambda_{stat.in} = \lambda_{gv.in} \cdot \lambda_{af.in} \cdot \lambda_{vent.in} = 0,983 \cdot 0,988 \cdot 0,905 = 0,880.$$



Рис. 4. Функциональная схема предлагаемой автоматической установки обнаружения и тушения пожаров в машинном зале

Кроме функциональной зависимости при расчете должны учитываться временные факторы, которые снижают вероятность безотказной работы. Временная зависимость надежности существующей и предлагаемой схемы АУПГ за 9 лет эксплуатации представлена на рис. 5.

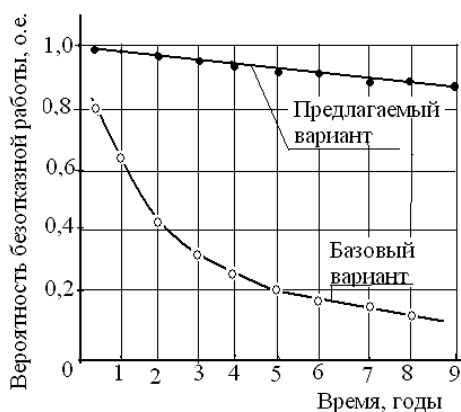


Рис. 5. Временная зависимость надежности существующей и предлагаемой схемы автоматической установки пожаротушения (АУПГ) за 9 лет эксплуатации

ВЫВОДЫ

Атомная энергетика остается определяющей в энергетических системах всех государств. Однако технические системы большой сложности и мощности, к которым относятся объекты ядерной энергетики, характеризуются высоким риском аварий, опасных для людей и окружающей среды и приводящих к катастрофическим последствиям. Поэтому первоочередной задачей использования ядерной энергии является значительное снижение аварийности блоков АЭС, и, в первую очередь, необходимо снижать вероятность возникновения

пожаров, которые являются главным фактором гибели персонала и утраты материальных ценностей станций. Следует учитывать, что старение электрооборудования и недостаточное качество выполнения ремонтов, сервисного обслуживания и модернизации способствует увеличению частоты возникновения пожаров на АЭС.

Низкое качество установленных систем оповещения приводит к искажению информации, поступающей к оперативному персоналу станций. В результате возможно принятие неверных решений при срабатывании систем пожаротушения. Наиболее опасно игнорирование персоналом сигналов о пожаре, которое приводит к опасности продолжения работы персонала при автоматически включившейся системе пожаротушения.

Для повышения надежности работы автоматических установок пожаротушения необходимо дублировать каналы автоматической системы пожаротушения и сигнализации наиболее пожароопасных помещений: реакторного, машинного отделения и специального корпуса, помещений БЩУ и кабельных каналов (см. предлагаемую схему, рис. 4). Более высокая надежность таких схем сохраняется и на протяжении всего срока эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Key world energy statistics 2018 [Электронный ресурс]. – France, Paris: International Energy Agency. – 51 p. – Режим доступу: <https://webstore.iaea.org/key-world-energy-statistics-2018>
2. Шевченко В. В. Роль кризисов в динамике развития мировой энергетики и теория циклического развития [Электронный ресурс] / В. В. Шевченко, С. Н. Лутай // Всеукраинский научный сборник "Научные труды Донецкого национального технического университета", серия "Электротехника и энергетика". – Донецк : ДонНТУ, 2013. – С. 266–272. – Режим доступу: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2549796>
3. Operational & Long-Term Shutdown Reactors by country (March 2019) [Электронный ресурс] / International Atomic Energy Agency, Power Reactor Information System. – Режим доступу: <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>
4. Key World Energy Statistics [Электронный ресурс]. – Paris: International Energy Agency. – France, 2017. – 95 p. – Режим доступу: <https://www.iaea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>
5. Nuclear Power Reactors of Ukraine and Electricity Production Share in 2017 [Электронный ресурс] / International Atomic Energy Agency, Power Reactor Information System. – Режим доступу: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=UA>
6. Про роботу Енергоатома у 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступу: http://energoatom.com.ua/ua/press_centr-19/infografika-28/p/pro_robotu_energoatoma_u_2017-3975
7. Концепция эволюции атомных технологий (первая версия) / Атомная энергия 2.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступу: <http://www.atomic-energy.ru/2.0>
8. Шевченко В. В. Определение риска и вероятности возникновения пожара на АЭС [Электронный ресурс] / В. В. Шевченко, И. Я. Лизан, С. Е. Шевченко // Системы управления, навигации и связи : сб. науч. трудов. – Украина, Киев: ГП "ЦНИИ навигации и управления", 2011. – № 1(17). – С. 259–264. – Режим доступу: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2532045>
9. Shevchenko V. V. Proposals for reducing the accident rate on nuclear power plants and minimizing of accident consequences [Электронный ресурс] / V. V. Shevchenko, A. S. Shevchenko, I. V. Sergiyenko // Bulletin of the Kharkov Regional Institute of Public Health Services. – 2019. – № 2(88). – Pp. 31–43. – Режим доступу: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2596459>
10. Шевченко В. В. Соотношение технического и человеческого фактора в выполнении задачи безопасного продления сроков эксплуатации энергоблоков АЭС Украины [Электронный ресурс] / В. В. Шевченко // Международный электронный научно-практический журнал «WayScience». – 2018. – № 2(2). – С. 114–138. – Режим доступу: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2196905>
11. Еришов Г. А. Вероятностный анализ безопасности при пожарах в помещениях Тяньваньской АЭС [Электронный ресурс] / Г. А. Еришов, А. С. Солодовников, В. М. Гавриленко и др. // Материалы 4-й МНПК "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 23–26.05.05, Подольск, РФ. – Режим доступу: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2005/8.html>
12. Фогилев И.С. Обеспечение действий оперативного персонала при возникновении пожаров в помещениях АЭС: дис. канд. тех. наук: спец. 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность» / И. С. Фогилев. – Москва : рукопись, 2018. – 154 с. – Режим доступу: <https://academygps.ru/upload/iblock/408/40810da34490f67ccf34265f16cfe8c7.pdf>