

# ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, ЭКОЛОГИЯ ЖИВЫХ СИСТЕМ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 614.89

**МАТВЕЕВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ,  
ПОПИВЧАК ИВАН ИГОРЕВИЧ**

## УПРАВЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПЕРСОНАЛА АЭС ПРИ ПОЖАРЕ\*

### АННОТАЦИЯ

В условиях потенциального воздействия на персонал АЭС опасных факторов пожара требуется принятие соответствующих мер защиты, направленных на обеспечение эвакуации в безопасную зону. В статье проведен анализ возможных сценариев пожара в одном из зданий Ленинградской АЭС. Рассмотрен подход к оценке эффективности применения средств защиты персонала АЭС при пожаре.

**Ключевые слова:** АЭС; пожар; опасные факторы пожара; эвакуация; средства индивидуальной защиты органов дыхания и зрения; самоспасатели.

**MATVEEV A.V.,  
POPIVCHAK I. I.**

## STAFF SAFETY MANAGEMENT OF NUCLEAR POWER PLANTS IN THE FIRE

### ABSTRACT

Appropriate protective measures are required to ensure the evacuation of staff to a safe area under the conditions of a potential impact on a nuclear power plant by dangerous fire factors. The article analyzes possible fire scenarios in one of the buildings of the Leningrad nuclear power plant. An approach to assessing the effectiveness of the use of protective equipment for nuclear power plant personnel during a fire is considered.

**Keywords:** Nuclear power plant; fire; fire hazards; evacuation; respiratory protective equipment; self-rescuers.

### Введение

Промышленные объекты ядерной энергетики имеют высокую потенциальную опасность, связанную с возможностью массового поражения людей в случае возникновения крупных аварий и пожаров. Авария и пожар на Чернобыльской АЭС явились убедительным подтверждением того, что недостаточная защищенность таких объектов приводит к губительным последствиями для населения не только конкретного региона, на территории которого расположен аварийный объект, но и огромных окружающих территорий [1].

Для объектов АЭС характерен высокий риск возникновения аварий и пожаров [2, 3]. Большинство помещений АЭС имеют высокую пожарную нагрузку. На площадках АЭС расположено большое количество кабельных систем, используется множество горючих веществ.

Пожары на данных объектах потенциально могут приводить к возникновению радиационной опасности. Кроме того, они и непосредственно наносят огромный социальный и материальный ущерб в результате гибели людей, уничтожения и повреждения материальных ценностей, сооружений, оборудования.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-08-01085

Анализ пожаров, происшедших на АЭС с реакторами всех типов в мире, показывает, что наиболее часто пожары возникают в машинных залах, реакторных отделениях, открытых распределительных устройствах, деаэрационных этажерках и участках с размещением электротехнических устройств [4].

К числу первостепенных действий при возникновении пожара относятся:

- отключение технологического оборудования;
- тушение пожара первичными средствами пожаротушения;
- эвакуация людей.

В условиях потенциального воздействия на персонал АЭС опасных факторов пожара требуется принятие соответствующих мер защиты, направленных на обеспечение безопасной эвакуации людей, не участвующих в пожаротушении до прибытия спасательных подразделений, а также выполнении работ по отключению технологического оборудования. При этом в процессе эвакуации возможно применение таких средств защиты как [5]:

- средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения;
- средств защиты тела человека от воздействия высокой температуры, открытого пламени, искр;
- средств самоспасения с высоты в случае блокирования основных эвакуационных выходов.

Однако до настоящего времени практически не проводились исследования, ориентированные на оценку эффективности использования данных средств при пожаре, в том числе на объектах АЭС. Именно на решение задачи оценивания влияния применения средств индивидуальной защиты и самоспасения с высоты при пожаре на величину индивидуального пожарного риска на объектах АЭС направлена данная работа.

#### **Подход к оценке эффективности применения средств защиты персонала АЭС при пожаре**

Вопросы разработки моделей и методик оценки эффективности применения средств самоспасения с высоты, когда оказываются заблокированными основные эвакуационные выходы, подробно рассмотрены в статьях [6-10] и в данной работе не затрагиваются.

Уровень пожарной безопасности в зданиях принято оценивать с помощью показателя индивидуального пожарного риска [11]. Однако существующие в настоящее время методы и модели не позволяют проводить оценку влияния использования в зданиях средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) на значение показателя индивидуального пожарного риска.

Целью применения СИЗОД является уменьшение количества пострадавших на пожарах на объектах АЭС по причине негативного воздействия опасных факторов пожара (ОФП) на рабочих местах или в процессе эвакуации.

Для оценки эффективности применения СИЗОД была введена единая совокупность вероятностных показателей (табл.1), которые предназначены для оценки вероятности защиты людей в течение времени защитного действия СИЗОД.

Таблица 1

Вероятностные показатели эффективности применения СИЗОД

Обозначение	Характеристика
$P_1$	вероятность присутствия устройства в помещении, где может находиться человек в момент начала пожара в здании или другой чрезвычайной ситуации
$P_2$	вероятность использования СИЗОД персоналом в случае пожара или другой чрезвычайной ситуации
$P_3$	вероятность правильного использования персоналом СИЗОД
$P_4$	вероятность исправности СИЗОД, обеспечивающего безотказное его функционирование при эвакуации персонала

Вероятность эффективного применения СИЗОД  $P$  будет представлять собой мультипликативную свертку частных вероятностных показателей, т.е.  $P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4$ .

Временными показателями, которые учитываются для оценки вероятности эвакуации людей, а также величины индивидуального пожарного риска, являются: время блокирования основных эвакуационных путей, время начала эвакуации, расчетное время эвакуации, время существования скопления людей на участках пути эвакуации [11].

Временными характеристиками при эвакуации во время пожара [12] с учетом использования СИЗОД и средств самоспасения с высоты (см. рис. 1) являются следующие:

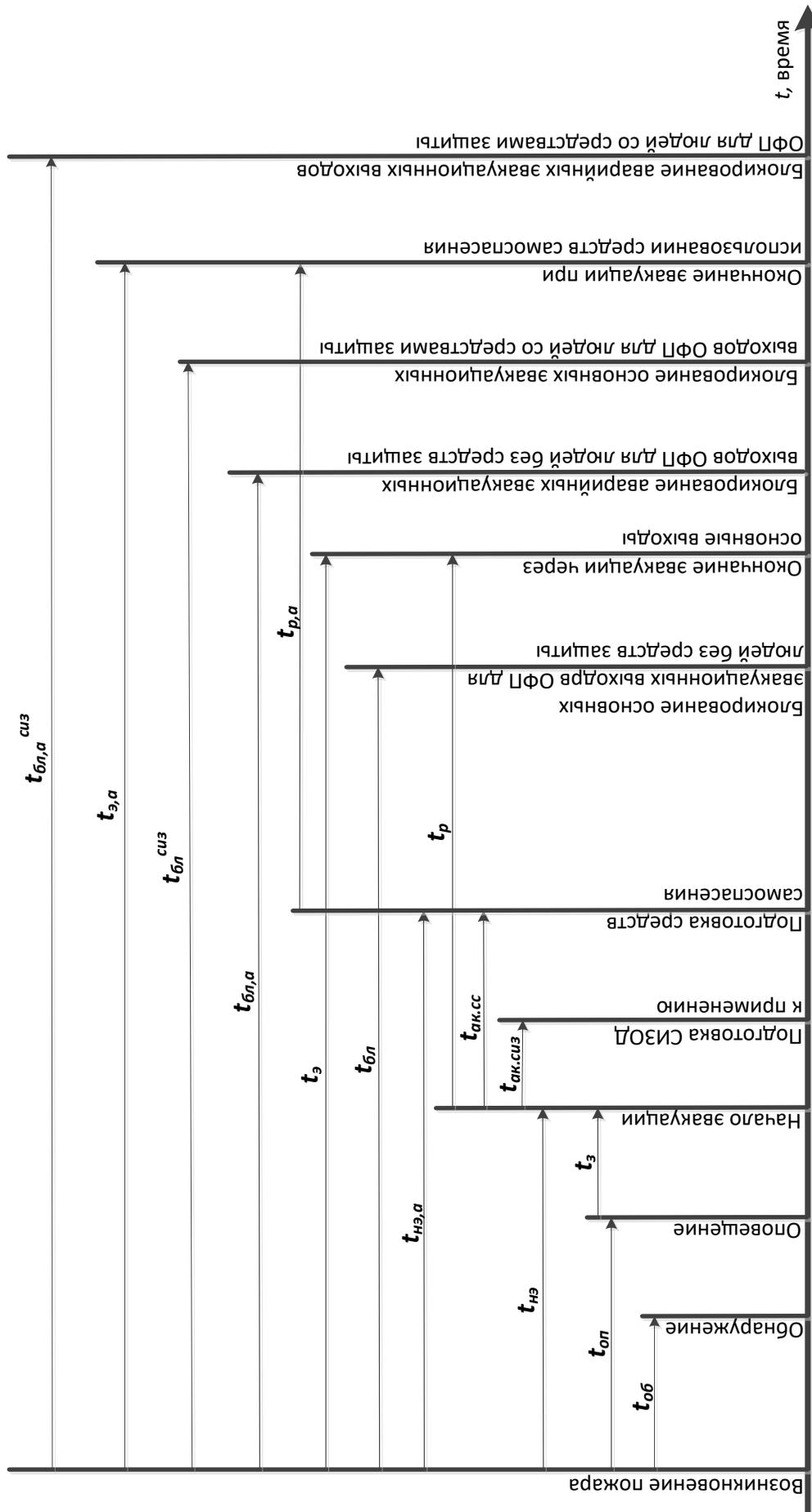


Рисунок 1 – Временные характеристики при основной и аварийной эвакуации, а также применении СИЗОД

$t_{об}$  – время от момента возгорания до момента обнаружения пожара;

$t_{оп}$  – время оповещения с момента обнаружения до момента сигнализации;

$t_3$  – время задержки с момента оповещения о пожаре до момента начала перемещения людей в безопасную зону;

$t_{нэ}$  – время начала эвакуации (интервал времени от возникновения пожара до начала перемещения людей в безопасную зону);

$t_{ак.сиз}$  – время активации (приведение в действие) СИЗОД;

$t_{ак.св}$  – время активации (приведение в действие) средств самоспасения с высоты;

$t_{нэ,а}$  – время начала эвакуации (интервал времени от возникновения пожара до начала перемещения людей в безопасную зону) людей, использующих СИЗОД и средства самоспасения с высоты;

$t_{бл}$  – время блокирования основных эвакуационных выходов для людей, незащищенных СИЗОД;

$t_p$  – расчетное время эвакуации от момента начала эвакуации до момента выхода всех людей в безопасную зону через основные выходы;

$t_э$  – требуемое время эвакуации от момента возгорания до момента выхода всех людей, незащищенных СИЗОД, в безопасную зону;

$t_{бл,а}$  – время блокирования аварийных эвакуационных выходов, используемых при применении средств самоспасения;

$t_{бл}^{сиз}$  – время блокирования основных эвакуационных выходов для людей защищенных СИЗОД;

$t_{р,а}$  – расчетное время эвакуации от момента начала эвакуации до момента выхода всех людей в безопасную зону через аварийные выходы при использовании средств самоспасения;

$t_{э,а}$  – требуемое время эвакуации от момента

возгорания до момента выхода всех людей в безопасную зону через аварийные выходы при использовании средств самоспасения;

$t_{бл,а}^{сиз}$  – время блокирования аварийных эвакуационных выходов, используемых при применении средств самоспасения, для людей защищенных СИЗОД.

Для оценки вероятности эвакуации людей с учетом использования СИЗОД необходимо рассмотреть несколько сценариев событий. Дерево событий соответствующее сценариям представлено на рис. 2.

Вероятность эвакуации персонала объекта при каждом из сценариев можно рассчитать на основе формулы (4) методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [11]. Однако в случае сценариев 2 и 3 (при использовании СИЗОД) необходимо учитывать возможное изменение времени блокирования эвакуационных путей, расчетного времени эвакуации, а также дополнительное время, необходимое для активации СИЗОД. Для сценария 3, когда было неправильно использовано средство защиты и оно оказалось в нерабочем состоянии, время блокирования эвакуационных путей оказывается таким же, как и в сценарии 1.

С учетом рассмотренного дерева событий (рис. 2) можно оценить интегральный показатель вероятности эвакуации персонала из объекта АЭС по основным эвакуационным путям с учетом использования СИЗОД  $P_э^{сизод}$ , который будет определяться следующим образом:

$$P_э^{сизод} = (1 - p_1 \cdot p_2) \cdot P_1 + p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot P_2 + p_1 \cdot p_2 \cdot (1 - p_3 \cdot p_4) \cdot P_3;$$

где  $P_i$  – вероятность эвакуации персонала при  $i$ -ом сценарии соответственно,  $i=1,2,3$ .

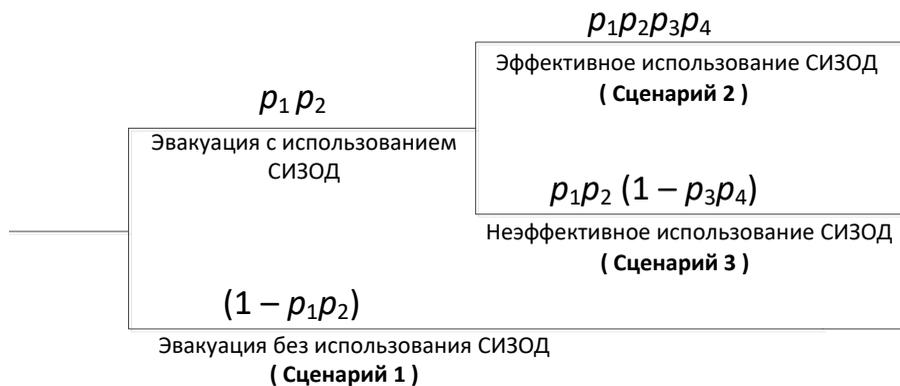


Рисунок 2 – Дерево событий при эвакуации людей с использованием СИЗОД

## Анализ возможных сценариев пожара здания 401 Ленинградской АЭС

Апробация предлагаемого инструментария проводилась на примере здания 401 энергоблоков № 1,2 Ленинградской АЭС. На начальном этапе требовалось проведения анализа возможных сценариев пожаров здания.

### 1. Пожар на главном маслобаке (ГМБ) ТГ-2 на блоке Г в машинном зале здания 401 (сценарий №1)

Блок Г – машинный зал турбогенераторов. Размер 372x45x30м. Наружные стены из навесных ж/б панелей по металлическим колоннам. Наружные стены защищены теплоизоляционными панелями. Перекрытия междуэтажные – ж/б плиты и монолит. Кровля – ж/б плиты по металлическим фермам, покрытым огнезащитным составом «Брандшутц», минераловатные плиты ППЖТ-200, цементно-песчаная стяжка, 2 слоя изопласта. 3 противопожарных пояса из ОКМ шириной по 6 метров каждый.

Основным технологическим оборудованием являются четыре турбогенератора. Каждый энергоблок имеет по два турбогенератора электрической мощностью по 500 МВт, состоящие из турбины насыщенного пара типа К-500-65/3000 и синхронного генератора трехфазного тока ТВВ-500-2 с числом оборотов 3000 в минуту.

Турбина рассчитана на работу со свежим паром, давлением 65 атм. и  $T=279.5^{\circ}\text{C}$ , с промежуточным двухступенчатым перегревом до  $265^{\circ}\text{C}$ , при давлении 3.3 атм. Длина турбины 34.96 м с генератором 57 м Реактор РБМК снабжает паром две турбины, работа которых не взаимосвязана.

Наибольшую пожарную опасность машинного зала представляют турбогенераторы, в которых используется масло  $T_{п}-22\text{с}$  по 80 т на каждую турбину, и водород  $94\text{ м}^3$  под давлением 4.5 атм. на каждый генератор.

Масло турбинное ( $T_{п}-22\text{с}$ ) – вязкая горючая жидкость  $T_{всп}=184^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{воспл}=400^{\circ}\text{C}$ . Водород ( $\text{H}_2$ ) – горючий бесцветный газ.  $T_{самовоспл}=510^{\circ}\text{C}$ , НКПВ-4.12%, ВКПВ-75% объема, нормальная скорость распространения пламени  $-2,7\text{ м/с}$ , минимальное взрывоопасное содержание кислорода  $-5\%$  объема.

Каждый турбогенератор имеет свою маслосистему, которая является общей для системы смазки, гидродожима, регулировки и защиты.

Маслосистема состоит из:

- главного маслобака (ГМБ), емкостью  $80\text{ м}^3$ , который находится с торца площадки обслуживания ТГ;
- трех масляных насосов, производительностью  $700\text{ м}^3/\text{час}$  каждый (отм.-2.40 район ГМБ);
- семи трубчатых маслоохладителей (отм. – 2.40 под ГМБ);
- трёх напорных маслобаков, емкостью  $10\text{ м}^3$  каждый (отм.+14.40 по ряду Р);
- демпферного маслобака (отм.+14.40 по ряду Р);
- системы напорных и сливных трубопроводов, а также системы КИП.

Масло из ГМБ можно слить в резервную емкость по трубопроводу диаметром 300 мм. Задвижки находятся на отм. +0.00, штурвалы открытия задвижек на отм.+7.20. Задвижки открываются вручную.

При возникновении пожара на турбогенераторе производится его останов, со срывом вакуума из системы охлаждения генератора и вытеснением водорода азотом по заданной программе (только обслуживающим персоналом). Вытеснение производится в течение 3-х часов.

Энергоснабжение в машзале от 380 В – двигатели приводов электрозадвижек до 20 кВ – выходное напряжение генераторов.

Основную пожарную нагрузку машинного зала турбогенераторов составляет турбинное масло, водород. Интенсивное развитие пожар получит при нарушении уплотнений маслопроводов и разлива масла.

Оперативно-тактическая обстановка осложнится растеканием масла па отметку  $-2.40$ . Максимальная скорость роста площади пожара при растекании горящего масла достигает  $25\text{ м}^2/\text{мин}$ . и зависит от степени и места повреждения системы. При этом происходит быстрое нарастание среднеобъемной температуры и выделяется большое количество высокотоксичных продуктов сгорания. Образующиеся горящие факелы и мощные конвективные тепловые потоки быстро нагревают элементы металлических ферм до критической температуры, что может привести к обрушению строительных конструкций.

В связи с нахождением в машинном зале постоянно обслуживающего персонала время до сообщения о пожаре равно времени обнаружения, т.е. – 0 минут, а боевое развертывание с установкой машин на ближайшие гидранты – 8 минут.

За наихудший вариант принимаем возникновение пожара на главном маслобаке (ГМБ) ТГ-2 по следующему сценарию.

После проведения ППР ТГ-2 фланцевое соединение на маслопроводе насоса МИГИ, установленного на крышке ГМБ отм. + 7.20 не было закреплено. При пуске маслосистемы в работу масло через образовавшееся отверстие  $d=25$  мм попадает на электродвигатель насоса МНГП-21. В результате короткого замыкания произошло загорание. Из образовавшегося отверстия диаметром 25 мм масло разлилось на отметки +7.20, +3.60, -2.40.

Площади пожара и тушения  $S_{п} = S$  разлива масла за 120 секунд, (время, в течение которого обслуживающий персонал производит отключение питающего маслопровода). Согласно НПБ-105-95 п.3.2 площадь испарения при разливе на пол определяется исходя из расчета, что 1 литр смеси разливается на  $1\text{ м}^2$  помещения.

Получено, что за 120 секунд из данного трубопровода выльется 636л масла, которое ввиду конструктивных особенностей машзала прольется на отметку:

- +7.20 –  $18\text{ м}^2$ ;
- +3.60 –  $28\text{ м}^2$ ;
- 2.40 –  $450\text{ м}^2$ .

## 2. Пожар в помещении Главных циркуляционных насосов (ГЦН) блока А здания 401 (сценарий №2)

ГЦН являются основным оборудованием контура многократной принудительной циркуляции (КМЦЦ), который предназначен для обеспечения циркуляции теплоносителя через активную зону реактора.

В качестве ГЦН используются насосы ЦВН-8. Тип – центробежный, вертикальный, одноступенчатый, с уплотнением вала, привод-электродвигатель мощностью 5500 кВт.

ГЦН расположены в блоках А и Б, отм. + 0.00, по 4 штуки в ряд в каждом помещении, по 8 на каждый блок. Размер помещения  $30 \times 9.20 \times 19.20\text{ м}$ . Площадь каждого помещения составляет  $276\text{ м}^2$ .

Наибольшую пожарную опасность ГЦН представляют электродвигатели, для смазки которых используется турбинное масло в количестве 330л. в каждом ГЦН. Полный объем масла в одном помещении составляет 1320 литров. Масло турбин-

ное Т-22, вязкая горючая жидкость ( $T_{\text{всп}}=184^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{самовоспл.}}=400^\circ\text{C}$ ).

Кроме того, насосы системой трубопроводов связаны с пом. 09/1-4 (маслохозяйство ГЦН), которые расположены на отм. – 6.40. В каждом помещении находится маслобак ёмкостью  $5\text{ м}^3$ , соединённый маслопроводом с маслосетью машзала блока Г.

Технологические протечки водомасляной эмульсии через поддон каждого электродвигателя ГЦН собираются в бак ВМЭ (водомасляной эмульсии  $V=1\text{ м}^3$ ) в пом. 09/1-4.

Электродвигатели ГЦН запитаны напряжением 6 кВ, а электропривода задвижек обвязки ГЦН от секций с напряжением – 380 В.

Пожаротушение помещения электродвигателей ГЦН осуществляется дренчерной установкой водяного пожаротушения. Сигнал выведен на ЩПБ отм. +7.20. Запуск установки ручной. Запорная арматура находится в пом.113 на отм.+0.00 ряд Л-М напротив каждого помещения. Запуск системы ВПТ ГЦН осуществляется после снятия напряжения с электродвигателей ГЦН и приводов арматуры обвязки.

У торцевых стен помещения на отм.+0.00 находятся первичные средства пожаротушения (огнетушители). Сигнализация: все помещения электродвигателей ГЦН оборудованы АПС со световыми извещателями типа ИП 329-2 «Аметист» с выводом сигнала на ЩПБ. Помещения маслохозяйства ГЦН оборудованы тепловыми извещателями ДПС-038 с выводом сигнала на ЩПБ.

Основную пожарную нагрузку помещений ГЦН составляет турбинное масло системы смазки ГЦН. Интенсивное развитие пожар получит при нарушении уплотнений маслопроводов и разлива масла. Оперативно-тактическая обстановка осложнится растеканием масла на электродвигатели и маслоблоки других ГЦН. Максимальная скорость роста площади пожара при растекании горящего масла достигает 25 м/мин. и зависит от степени и места повреждения системы.

При этом происходит быстрое нарастание среднеобъемной температуры и выделяется большое количество высокотоксичных продуктов сгорания.

Время до сообщения о пожаре по условиям объекта равно времени обнаружения, т.е. – 0 минут, так как в данном блоке постоянно находится обслуживающий персонал и помещение оборудовано

пожарной сигнализацией, а боевое развертывание с установкой машин на ближайшие гидранты – 4 минуты.

За наихудший вариант принимаем разрыв трубопровода на фланцевом соединении задвижки 1ГЦН 12/05 ( $d=25\text{мм}$ , давление 6,5 атм.) с последующим возгоранием вытекающего масла от соприкосновения с корпусом насоса через который проходит теплоноситель контура (вода) с температурой  $+270^{\circ}\text{C}$ .

Площади пожара и тушения  $S_{\text{п}} = S$  разлива масла за 120 секунд, (время, в течение которого обслуживающий персонал производит отключение питающего маслопровода). Согласно НПБ-105-95 п.3.2 площадь испарения при разливе на пол определяется исходя из расчета, что 1 литр смеси разливается на  $1\text{м}^2$  помещения.

Получено, что за 120 секунд из данного трубопровода выльется 528л масла, которое прольется на всю площадь помещения ГЦН –  $276\text{м}^2$ , следовательно площадь пожара и тушения составит  $276\text{м}^2$ .

**Результаты оценки пожарного риска здания 401 Ленинградской АЭС**

*1. Оценка пожарного риска для здания 401 Ленинградской АЭС без использования средств индивидуальной защиты и самоспасения*

Для оценки пожарного риска, согласно методике [11], был проведен анализ аварийных ситуаций при пожаре и выбор наиболее опасных ситуаций для последующего расчета параметров, определяющих условия безопасной эвакуации людей.

В качестве основных факторов, осложняющих обстановку внутреннего пожара, были приняты следующие:

- максимальная протяженность эвакуационного пути;
- максимальное количество людей в помещении;
- блокирование очагом пожара одного из выходов из помещения (здания).

На основании результатов анализа, в ходе которого были последовательно рассмотрены все варианты пожаров в здании с учетом приведенных выше факторов, были выбраны две наиболее опасные аварийные ситуации, описанные выше.

Расчетное время эвакуации людей  $t_p$  из помещений здания устанавливалось по расчету времени

движения одного или нескольких людских потоков через эвакуационные выходы от наиболее удаленных мест размещения людей при использовании программы «СИТИС: Флоутек». Результаты расчетов представлены в табл.2

Таблица 2

Время выхода из здания 401 Ленинградской АЭС

Выход	Время
(Выход В-1)	1,78 мин
(Выход В-12)	6,04 мин
(Выход В-15)	1,71 мин
(Выход В-5)	3,56 мин
(Выход К-11)	0,90 мин
(Выход К-13)	1,90 мин
(Выход К-3)	0,82 мин
(Выход К-4)	0,23 мин

Для расчета времени блокирования путей эвакуации объекта была принята зонная модель развития опасных факторов пожара, согласно методике [11]. Для проведения расчетов времени блокирования эвакуационных путей здания 401 Ленинградской АЭС была использована программа «СИТИС: Блок» на основе модуля CFAST, реализующего зонную модель тепломассопереноса при пожарах.

Результаты расчета времени достижения предельно допустимых значений ОФП для сценария № 1 представлены в табл.3, для сценария №2 в табл.4, где введены обозначения: В – время блокирования, с; Т – по повышенной температуре, с; V – по потере видимости, с;  $O_2$  – по пониженному содержанию кислорода, с;  $CO_2$  – по  $CO_2$ , с; CO – по CO, с; HCl – по HCl, с; AT – по тепловому потоку, с.

Таблица 3

Результаты расчета времени достижения предельно допустимых значений ОФП для сценария № 1

Расчетная точка	В	Т	V	$O_2$	$CO_2$	CO	HCl	AT
(Выход В-1)	<b>126</b>	303	333	321	> 600	332	> 600	126
(Выход В-12)	<b>472</b>	> 600	472	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600
(Выход В-15)	<b>126</b>	303	333	321	> 600	332	> 600	126
(Выход В-5)	<b>568</b>	> 600	568	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600
(Выход К-11)	> <b>600</b>	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600
(Выход К-13)	<b>339</b>	339	350	345	> 600	362	> 600	381
(Выход К-3)	<b>459</b>	> 600	459	575	> 600	496	> 600	> 600
(Выход К-4)	<b>574</b>	> 600	574	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600

Таблица 4

Результаты расчета времени достижения предельно допустимых значений ОФП для сценария № 2

Расчетная точка	<i>B</i>	<i>T</i>	<i>V</i>	<i>O<sub>2</sub></i>	<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>CO</i>	<i>HC1</i>	<i>AT</i>
(Выход В-1)	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600
(Выход В-12)	275	> 600	275	> 600	> 600	403	> 600	> 600
(Выход В-15)	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600
(Выход В-5)	175	200	243	300	> 600	> 600	> 600	175
(Выход К-11)	143	> 600	143	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600
(Выход К-13)	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600
(Выход К-3)	313	> 600	313	> 600	> 600	> 600	> 600	> 600
(Выход К-4)	124	182	124	181	> 600	178	> 600	221

Результаты расчета времени эвакуации персонала и необходимого времени эвакуации с учетом времени до начала эвакуации приведены в табл. 5.

При определении величин потенциального риска для персонала, находящегося в здании объекта, допускается рассматривать в качестве расчетного один наиболее неблагоприятный сценарий возникновения пожара, характеризующийся максимальной условной вероятностью поражения человека.

В этом случае расчетная частота возникновения пожара принимается равной суммарной

частоте реализации всех возможных в здании сценариев возникновения пожара. Для здания 401 Ленинградской АЭС данное значение  $Q_j = 2,09 \cdot 10^{-2}$ .

Вероятность  $P_{ТСij}$  эффективной работы технических средств по обеспечению пожарной безопасности *i*-го помещения при реализации *j*-го сценария пожара определялась по формуле:

$$P_{ТСij} = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - P_{ТСijk}),$$

где *K* – число технических средств противопожарной защиты;

$P_{ТСijk}$  – вероятность эффективного срабатывания (выполнения задачи) *k*-го технического средства при *j*-ом сценарии пожара для *i*-го помещения здания.

При определении значений  $P_{ТСij}$  следует учитывать только технические средства, направленные на обеспечение пожарной безопасности находящихся (эвакуирующихся) в *i*-ом помещении здания людей при реализации *j*-го сценария пожара. При этом учитываются следующие мероприятия:

- применение объемно-планировочных и конструктивных решений, обеспечивающих ограничение распространения пожара в безопасную зону (при организации эвакуации в безопасную зону);

Таблица 5

Результаты расчета времени эвакуации людей и необходимого времени эвакуации

Аварийная ситуация	Расположение расчетной точки	Время эвакуации, $t_{пв}$ , мин	Время до начала эвакуации $t_{нэ}$ , мин	$t_{эв} = t_{пв} + t_{нэ}$ , мин	Необходимое время эвакуации, $0,8 \cdot t_{бр}$ , мин	Выполнение условия: $t_{эв} \leq t_{бр}$
№ 1	(Выход В-1)	1,78	0	1,78	1,68	Не выполняется
	(Выход В-12)	6,04	0,5	6,54	6,29	Не выполняется
	(Выход В-15)	1,7	0	1,7	1,68	Не выполняется
	(Выход В-5)	3,56	0,5	4,06	7,57	Выполняется
	(Выход К-11)	0,9	0,5	1,4	>8	Выполняется
	(Выход К-13)	1,9	0,5	2,4	4,52	Выполняется
	(Выход К-3)	0,82	0,5	1,32	6,12	Выполняется
	(Выход К-4)	1,23	0,5	1,73	7,29	Выполняется
№ 2	(Выход В-1)	1,78	0,5	2,28	>8	Выполняется
	(Выход В-12)	6,04	0,5	6,54	4,58	Не выполняется
	(Выход В-15)	1,7	0,5	2,2	>8	Выполняется
	(Выход В-5)	3,56	0	3,56	2,9	Не выполняется
	(Выход К-11)	0,9	0,5	1,4	1,9	Выполняется
	(Выход К-13)	1,9	0,5	2,4	>8	Выполняется
	(Выход К-3)	0,82	0,5	1,32	4,2	Выполняется
	(Выход К-4)	1,23	0,5	1,73	1,7	Не выполняется

- наличие систем противодымной защиты рассматриваемого помещения и путей эвакуации;
- использование автоматических установок пожарной сигнализации (АУПС) в сочетании с СОУЭ;
- наличие установок пожаротушения в помещении очага пожара.

Учитывая, что данные помещения оборудованы автоматической пожарной сигнализацией, системой оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре, системой противодымной защиты, то:

$$P_{ТСij} = 1 - (1 - 0,8) \cdot (1 - 0,8) \cdot (1 - 0,8) \cdot (1 - 0,9) = 0,9992$$

где  $R_{соуэ} = 0,8$ ;  $R_{обн} = 0,8$ ;  $R_{пдэ} = 0,8$  – в соответствии с методикой [11].

Помещения оборудовано системой автоматического пожаротушения, следовательно,  $R_{ап}$  принимается равной 0,9 (в соответствии с методикой).

С учетом вышеизложенного величина потенциального пожарного риска для здания 401 Ленинградской АЭС составила:

$$P_i = \sum_{j=1}^J Q_j \cdot Q_{dij} = 2,09 \cdot 10^{-2} \cdot (1 - 0) \cdot (1 - 0,9992) = 1,62 \cdot 10^{-5}$$

## 2. Оценка пожарного риска для здания 401 Ленинградской АЭС с использованием персоналом средств индивидуальной защиты и самоспасения

В силу того, что результаты расчетов показали невозможность безопасной эвакуации персонала из здания 401 Ленинградской АЭС через основные и запасные пути эвакуации, предложено дополнительно использовать возможность применения средств самоспасения персонала, а также средства индивидуальной защиты органов дыхания и зрения (фильтрующие СИЗОД). Для персонала в фильтрующих СИЗОД в пределах времени защитного действия предельно-допустимые значения опасных факторов пожара будут равны:

- потеря видимости ниже уровня предельной дальности видимости (т.е. повышение оптической плотности дыма сверх предельно-допустимого значения);
- температура продуктов горения на уровне головы, равная 70° С.

Для расчета времени блокирования аварийных выходов, в которых располагались средства самоспасения, также была принята зонная модель

развития опасных факторов пожара. Было предложено использовать два аварийных выхода в силу ближайшего расположения к местам массового нахождения персонала, а также достаточно большим временем их блокирования ОФП.

Все устройства самоспасения с высоты делятся на виды:

- канатно-спускные устройства с автоматическим регулированием скорости спуска;
- канатно-спускные устройства с ручным регулированием скорости спуска;
- прыжковые средства спасения (пневматические маты);
- лестницы навесные спасательные;
- спасательные устройства на базе эластичного рукава;
- спасательные устройства на базе спирального рукава, трапы (желоба).

Для оценивания эффективности их использования при эвакуации было рассмотрено 4 вида устройств, а именно:

- Комплект индивидуального самоспасения, модель «Самоспасатель-7»;
- Самоспасатель «Барс»;
- Лестница навесная спасательная «ЛНС-9»;
- Прыжковое спасательное устройство «Куб жизни».

Для определения вероятности эвакуации персонала при использовании средств самоспасения использовались модели и методики, представленные в статьях [6-10].

Были определены значения пожарного риска в условиях применения СИЗОД и средств самоспасения, представленные в табл.6.

Таблица 6

Результат расчета индивидуального пожарного риска в здании 401 Ленинградской АЭС при использовании средств защиты и самоспасения

Тип спасательных средств у аварийных выходов 1, 2	Величина пожарного риска зд. 401 Ленинградской АЭС
ЛНС-9	$R_m = 3,24 \times 10^{-6}$
Барс	$R_m = 1,19 \times 10^{-6}$
Самоспасатель-7	$R_m = 5,08 \times 10^{-6}$
Каскад 5	$R_m = 3,62 \times 10^{-7}$

Представленные результаты показали, что при использовании средств самоспасения с высоты в совокупности с фильтрующими средствами инди-

видуальной защиты органов дыхания и зрения удалось повысить уровень безопасности персонала здания 401 энергоблоков 1, 2 Ленинградской АЭС в случае пожара.

### Выводы

Возникающие пожары на объектах АЭС требуют оперативного реагирования, актуализируют задачу обеспечения безопасности персонала при его эвакуации в безопасную зону. Это предполагает использование различных средств защиты, в том числе средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения, а также средств самоспасения с высоты. Использование данных средств позволяет в определенных случаях достичь снижение величины индивидуального пожарного риска до нормативного значения, а значит обеспечить безопасность персонала АЭС.

Предлагаемый подход позволяет разработать научно обоснованные требования к оснащению объектов АЭС соответствующими средствами защиты для поддержания на объектах требуемого значения показателя индивидуального пожарного риска.

### Список литературы

1. Иванов М.В., Матвеев А.В., Шевченко А.Б. Аналитическая модель системы управления пожарной безопасностью АЭС // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2010. – № 6 (113). – С. 91-95.
2. Jee M.H., Moon C.K., Kim H.T. Performance-based fire fighting strategies for confined fire zones in nuclear power plants. *Progress in Nuclear Energy*. 2013; 62: 16-25.
3. McGrattan K., Peacock R., Overholt K. Validation of fire models applied to nuclear power plant safety. *Fire Technology*. 2016; 52(1): 5-24.
4. Audouin L., Rigollet L., Prétel H., Le Saux W., Röwekamp M. OECD PRISME project: Fires in confined and ventilated nuclear-type multi-compartments-

Overview and main experimental results. *Fire Safety Journal*. 2013; 62: 80-101.

5. Пузач С.В., Лебедченко О.С., Ищенко А.Д., Фогилев И.С. Временной механизм воздействия опасных факторов пожара на персонал АЭС и комплексная защита от них // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26. – № 8. – С. 15-24.

6. Матвеев А.В., Ефремов С.В. Модель процесса аварийной эвакуации из здания в случае пожара при нестационарном потоке людей // Безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 2. – С. 46-50.

7. Иванов М.В., Матвеев А.В., Минкин Д.Ю., Писков В.Ю. Модель системы управления аварийной эвакуацией на объектах с массовым пребыванием людей // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2011. – №4. – С. 10-16.

8. Matveev A.V., Scherbakov O.V., Maximov A.V., Podrzhkina T.A., Artamonov V.S. Evaluation models of effectiveness of hose rescue equipment used in evacuation of people from high-rise buildings. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017; 12(20): 5190-5195.

9. Matveev A.V. The model of the process of emergency evacuation from the building while using the self-rescue equipment in case of the fire. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018; 13(15): 4535-4542.

10. Матвеев А.В., Иванов М.В. Критерий эффективности управления пожарным риском при использовании средств аварийной эвакуации // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2011. – № 6-2(138). – с. 165-170.

11. Приказ МЧС России № 404 от 10.07.2009 «Об утверждении методики расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» (в ред. от 14.12.2010).

12. ISO (2009). ISO/TR 16738 fire-safety engineering – technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people. Technical report, ISO.

Статья поступила в редакцию 6 июня 2018 г.

Принята к публикации 20 сентября 2018 г.