

УДК 621.039.586

**АНАЛИЗ ЯДЕРНОГО И РАДИАЦИОННОГО РИСКА АВАРИЙ  
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ХРАНИЛИЩА ОЯТ**© 2013 К.И. Ильин<sup>1</sup>, В.В. Светухин<sup>1</sup>, Б.Б. Костишко<sup>1</sup>, В.Д. Кизин<sup>2</sup><sup>1</sup> Научно-исследовательский технологический институт  
Ульяновского государственного университета<sup>2</sup> Открытое акционерное общество «Государственный научный центр –  
Научно-исследовательский институт атомных реакторов», г. Димитровград

Поступила в редакцию 26.11.2013

Проведенные исследования позволили не только определить тонкие места при реализации проекта хранилища отработавшего ядерного топлива, но и определить перечень требований, исполнение которых позволит безаварийно эксплуатировать указанные объекты.

На основе анализа статистических данных и оценок экспертов были получены данные об имеющемся на сегодняшний момент риске эксплуатации рассмотренного объекта хранения отработавшего ядерного топлива.

Ключевые слова: анализ риска, радиационная безопасность, радиационно опасные объекты, матрица риска.

**ВВЕДЕНИЕ**

Энергетическая стратегия России на период до 2030 года предусматривает увеличение выработки электроэнергии на атомных электростанциях (АЭС). Однако эти планы могут иметь право на жизнь только при условии обеспечения достаточной безопасности, как указанных объектов, так и других объектов обеспечивающих их функционирование.

Следует отметить, что до недавнего времени при создании различных объектов одним из решающих факторов была дешевизна конструкций, причем не было должного экономического учета негативных последствий деятельности опасных производственных объектов. Это показал и опыт ликвидации последствий Чернобыльской аварии и недавние события на АЭС в Японии. Дальнейшее развитие атомной энергетики невозможно представить без создания соответствующих механизмов управления параметрами ядерного и радиационного риска.

Следует отметить, что в России в последние годы завершается формирование нормативной и

---

*Ильин Кирилл Игоревич, аспирант кафедры «Физическое материаловедение». E-mail: mr.ilyinki@mail.ru*

*Светухин Вячеслав Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, директор.*

*E-mail: slava@sv.uven.ru*

*Костишко Борис Борисович, аспирант кафедры «Физическое материаловедение»*

*Кизин Виктор Дмитриевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории радиационно-технологических методов и систем отдела радиационной безопасности. E-mail: niiar@niiar.ru*

правовой базы, определяющей условия функционирования ядерно- и радиационно опасных объектов. Уже введены: процедуры декларирования и экспертизы опасности эксплуатации (Федеральный закон № 116-ФЗ от 21.07.97 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»), лицензирование соответствующих видов деятельности (Федеральный закон № 170-ФЗ от 21.11.95 «Об использовании атомной энергии»). Реализация требований введённых в действие Федеральных законов требует проведения для каждого эксплуатируемого или создаваемого подобного объекта системного анализа риска.

Объекты хранения отработавшего ядерного топлива имеют свою специфику, которая не позволяет использовать рекомендованную методологию оценки риска аварий, применяемую для обоснования безопасности опасных производственных объектов. Поэтому возникла необходимость разработки и внедрения специальной методологии системного анализа ядерного и радиационного риска возможных аварий для таких объектов и использования её для обоснования их безопасности. Объектом исследования в 2013 году было хранилище для отработавшего ядерного топлива ОАО «ГНЦ НИИАР».

**КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ  
ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Центральное хранилище для отработавших тепловыделяющих сборок предназначено для приёма, перегрузки и временного хранения

ОТВС реакторных установок ВК-50, СМ-3, МИР-М1, БОР-60, АСТ и пеналов с делящими материалами после исследований. Для выполнения этих операций в здании имеются три бассейна и транспортный зал [1, 2]. Здание оснащено крановой тележкой грузоподъёмностью 100 т и мостовым краном грузоподъёмностью 15 т [1].

Бассейны 1 и 2 являются хранилищами ОТВС и пеналов, а бассейн 3, отсечённый от бассейнов 1 и 2 гидрозатворами, служит для выполнения транспортно-технологических операций [2, 3]. Бассейны заполнены дистиллированной водой. В целях защиты персонала от ионизирующего излучения все транспортно-технологические операции выполняются под слоем воды. В здании хранилища имеется установка очистки бассейновых вод с перлитовыми, песчаными и ионообменными фильтрами для снижения их радиоактивности.

В нормальных условиях эксплуатации хранилища для ОТВС исключается выход радиоактивных продуктов во внешнюю среду выше установленных норм. Оборудование и защитные сооружения объекта рассчитаны на возможность эксплуатации в пределах проектных значений природных воздействий. В пределах этих значений сохраняется целостность всех защитных барьеров: контейнеров, чехлов, трубопроводов, бассейнов, зданий. Повреждение или разрушение барьеров возможно лишь в случае превышения проектных значений природных воздействий. Практически исключена вероятность разрушения здания и оборудования вследствие техногенного воздействия на объекте и территории промплощадки [3, 4].

Благодаря организованной на объекте и промплощадке многоуровневой системе защиты от проникновения на территорию посторонних лиц диверсионные акты маловероятны [3].

Отключение электроэнергии по причине природного или техногенного воздействия не приведёт к неконтролируемому выбросу радиоактивных продуктов во внешнюю среду. На здании останется разряжение за счёт тяги высотной трубы вентиляционного центра даже при отключении вентиляторов вентиляционной системы объекта [3].

### **ПОДГОТОВКА ПЕРЕЧНЯ ИСХОДНЫХ СОБЫТИЙ ВОЗМОЖНЫХ АВАРИЙ**

Анализ основных причин и факторов, способствующих возникновению и развитию аварий в хранилище, позволил выбрать ряд аварий, которые с некоторой вероятностью могут возникнуть в процессе проведения работ и при хранении ядерных материалов и радиоактивных веществ.

В соответствии с требованиями нормативных документов рассматривались следующие исходные события аварий:

- отказы оборудования, систем или их отдельных элементов;
- ошибки персонала;
- внешние воздействия природного и техногенного происхождения.

При выборе аварий для дальнейшего анализа был использован программный комплекс «Analysis and prevention of emergency situations on the objects of the nuclear fuel cycle» [5], который позволил определить наиболее вероятные исходные события при проведении типовых операций с использованием штатного оборудования. Анализ выбранных сценариев развития аварий и предварительная оценка их последствий позволили внести ряд корректив в первоначальный перечень аварий и в их сценарии. С учётом рекомендаций нормативных документов для детального рассмотрения отбирались исходные события и сценарии аварий, которые, по мнению экспертов, имеют наибольшую вероятность возникновения и могут иметь наихудшие радиационные последствия. Исходные события, имеющие либо очень низкую вероятность возникновения, либо незначительные радиационные последствия, не рассматривались.

### **АВАРИЯ № 1 – РАЗГЕРМЕТИЗАЦИЯ БАСЕЙНА (МАЛАЯ ТЕЧЬ)**

Исходным событием аварии является отказ элементов мостового крана при проведении транспортно-технологических операций с ОТВС. Вероятность аварии при эксплуатации грузоподъёмных сооружений составляет  $6 \times 10^{-5} \text{ год}^{-1}$  на сооружение [6]. Доля из них на мостовые краны составляет 0,263 [6]. Следовательно, вероятность исходного события составляет в среднем  $6 \times 10^{-5} \times 0,263 = 1,6 \times 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ . Предполагается, что при каждой аварии мостового крана происходит падение чехла или другого предмета на дно бассейна.

Облучение персонала при выполнении работ по ликвидации последствий аварии будет определяться гамма-фоном рабочих мест, и эквивалентная доза ионизирующего излучения не превысит 20 мЗв на каждого участвующего. Продолжительность этих работ может составить до 20 рабочих смен. Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД) в местах проведения работ составит не более 0,12 мЗв/ч.

Воздействие на население практически исключено.

Уровень воздействия на персонал и население соответствует нулевому уровню шкалы

INES [7], а ухудшение глубоководной защиты – второму уровню шкалы INES, так как данное событие приводит к появлению радиоактивности в зонах, не предназначенных для этого по проекту.

### **АВАРИЯ № 2 – БОЛЬШАЯ ТЕЧЬ БАССЕЙНА ХРАНИЛИЩА ДЛЯ ОТВС**

Исходным событием аварии является внешнее воздействие – землетрясение, мощность которого выше проектных значений. Вероятность такого события составляет менее  $10^{-4}$  год<sup>-1</sup> [6].

Предполагаем истечение воды (объемом 1200 м<sup>3</sup>), находящейся выше уровня земли, из одного из бассейнов. Предположим также, что вылившаяся радиоактивная вода образует водоем в виде излучающего диска. Удельная активность воды бассейна на 90 % определяется <sup>137</sup>Cs и составляет примерно  $4 \cdot 10^6$  Бк/кг [2, 3].

Мощность экспозиционной дозы (МЭД) около образовавшегося водоёма или над ним составит примерно 2 мЗв/ч (0,2 бэр/ч). После впитывания радиоактивной воды в почву в воздухе над загрязнённой поверхностью земли вследствие ветрового подъёма возможно образование радиоактивных аэрозолей объёмной активностью до  $10^5$  Бк/м<sup>3</sup> (через месяц не более  $10^4$  Бк/м<sup>3</sup>), то есть выше допустимой объёмной активности в воздухе для персонала  $ДОА_{перс} = 1,7 \cdot 10^3$  Бк/м<sup>3</sup>. Из-за снижения уровня воды в бассейне уменьшится слой воды над ОТВС, а у некоторых сборок часть облучённого топлива, в частности у твэлов ОТВС реакторной установки ВК-50, окажется выше уровня воды. При этом МЭД в помещении возрастет. В этом случае уровень воды в бассейне предположительно составит 1,7 м, максимальное увеличение МЭД над бассейном в местах возможного пребывания персонала составит 7,3 Зв/ч (730 бэр/ч), что делает пребывание персонала в помещении хранилища опасным для жизни. Облучение персонала до поглощённой дозы излучения 1 Гр возможно при нахождении его в момент аварии в помещении хранилища.

Уровень воздействия на персонал соответствует третьему уровню шкалы INES: «событие, вызывающее такую мощность дозы или уровень загрязнения, при которых один или несколько работников легко могут получить дозу, приводящую к острым лучевым поражениям (например, суммарная доза на все тело порядка 1 Гр или на поверхности тела порядка 10 Гр)» [7]. Уровень воздействия на население соответствует нулевому уровню шкалы INES, а ухудшение глубоководной защиты – второму уровню шкалы INES, признаком которого может быть начало осушения твэлов.

### **АВАРИЯ № 3 – ОПОРОЖНЕНИЕ БАССЕЙНА**

Исходным событием аварии является ошибка персонала. Вероятность ошибки при выполнении заданий может достигать 0,2 на задание [6], необнаружение ошибок при контроле работы персонала – 0,01 на задание [6]. Следовательно, при одной операции в год вероятность исходного события не превысит  $0,002$  год<sup>-1</sup>.

Объём бассейна 3 составляет 500 м<sup>3</sup> [3]. Объём бассейнов 1 и 2 составляет 1700 м<sup>3</sup> [3]. Уровень воды в бассейне 1 или 2 уменьшится примерно на 2 м. Работы по ликвидации последствий аварии будут проведены дистанционно.

МЭД в помещении хранилища возрастёт и составит примерно 0,5 Зв/ч. Облучение персонала до эквивалентной дозы ионизирующего излучения более 50 мЗв возможно при нахождении его в момент аварии в помещениях хранилища. Расчёт облучения проводился так же, как в предыдущем случае. Радиационное воздействие на население практически исключено.

Уровень воздействия на персонал соответствует второму уровню шкалы INES: «событие, в результате которого суммарная мощность дозы гамма- и нейтронного облучения превышает 50 мЗв/ч в обслуживаемой зоне установки» [7]. Уровень воздействия на население и глубоководную защиту соответствует нулевому уровню шкалы INES, поскольку временное ухудшение параметров бассейна не окажет негативного воздействия на топливо.

### **ОЦЕНКА РИСКА АВАРИЙ**

На основе данных, полученных после проведённого анализа проектных и запроектных аварий в хранилище для ОТВС, была проведена классификация выявленных аварий с помощью матрицы ядерного и радиационного риска [8].

В зоне риска (рис. 1) выделены области: А, где обязателен детальный анализ риска и требуются оперативные меры безопасности для снижения риска (например, корректирующие действия в течение 3-х месяцев); В, где желателен детальный анализ риска и требуются меры безопасности (например, корректирующие действия в течение 12 месяцев); С, где рекомендуется проведение анализа риска и принятие мер безопасности (например, корректирующие действия в течение 24 месяцев).

В зоне риска необходимо планирование и проведение соответствующих корректирующих действий. В области пренебрежимо малого риска дополнительные меры безопасности не гарантируют снижения риска. В области недопустимо высокого риска требуется проведение немедлен-



**Рис. 1.** Вид матрицы риска, построенной на основе шкалы INES:  
 А, В, С – зона риска; 1, 2, 3 – номера аварий до проведения корректирующих мер;  
 2', 3' – номера аварий после проведения корректирующих мер

ных мер безопасности или остановка работы объекта.

Анализ данной матрицы позволяет сделать вывод о том, что аварии № 2 и № 3 попадают в область зоны риска, которая требует проведения корректирующих мероприятий. Выбранная для детального анализа авария № 1 не входит в зону риска и поэтому не требует проведения дополнительных мероприятий.

### ВЫБОР КОРРЕКТИРУЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ

Для уменьшения тяжести последствий аварий № 2 и № 3 предлагается разработка плана действий персонала при возникновении рассматриваемого исходного события с обязательным указанием времени эвакуации персонала из расчёта 5 минут, а также проведение ежегодных противаварийных тренировок персонала. Данные организационные мероприятия позволят уменьшить возможное облучение персонала:

- по сценарию аварии № 2 до эквивалентной дозы ионизирующего излучения менее 50 мЗв и соответственно присвоить данному событию второй уровень по шкале INES;

- по сценарию аварии № 3 до эквивалентной дозы ионизирующего излучения менее 20 мЗв и соответственно присвоить данному событию нулевой уровень по шкале INES.

Анализ полученной после выполнения корректирующих мероприятий матрицы позволяет сделать вывод о том, что аварии № 2 и № 3 выйдут за пределы зоны риска в область пренебрежимо малого риска, соответственно аварии № 2' и № 3'.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы определены и проанализированы возможные проектные и запроектные аварии при хранении ОТВС и проведении транспортно-технологических операций с ними в здании хранилища, из возможных аварий выбраны наиболее опасные. Для них проведён детальный анализ радиационных последствий.

Выполнена оценка риска возможных аварий в хранилище для ОТВС и предложены корректирующие мероприятия, выполнение которых позволит обеспечить объекту уровень пренебрежимо малого риска.

*Данная работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чечеткин Ю.В. Обращение с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом в ГНЦ РФ

- НИИАР. Димитровград: ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». 2006. 32 с.
2. *Чечеткин Ю.В., Чечеткина З.И., Грачев А.Ф. и др.* Топливо исследовательских реакторов, его хранение и транспортирование [под общей редакцией профессора, д.т.н. Ю.В. Чечеткина]. Димитровград: ДИТУД, УлГТУ, 2005.
  3. Оценка воздействия на окружающую среду для размещения исследовательской ядерной установки Многоцелевой исследовательский реактор на быстрых нейтронах (МБИР) в пределах промплощадки ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград, Ульяновская область. Книга 1 [Электронный ресурс]. 2011. URL: [http://www.niiar.ru/sites/default/files/ovos\\_book1.pdf](http://www.niiar.ru/sites/default/files/ovos_book1.pdf) (дата обращения 01.02.2013).
  4. *Ефаров С.А.* Анализ радиационных последствий аварий в хранилище отработанного ядерного топлива // Сб. рефератов и статей новые технологии для энергетики, промышленности и строительства. Димитровград: ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», 1998.
  5. *Ильин К.И., Светухин В.В.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012618644. ANALYSIS AND PREVENTION OF EMERGENCY SITUATIONS ON THE OBJECTS OF THE NUCLEAR FUEL CYCLE.
  6. *Петрин С.В.* Анализ безопасности установок и технологий: методическое пособие по проблемам регулирования риска. Часть 3. Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006. 167 с.
  7. *Жук Ю.К.* Международная шкала ядерных событий (ИНЕС): руководство для пользователей: [пер. с англ.]. IAEA-INES, 2001.
  8. *Ильин К.И.* Матрица радиационного риска как инструмент ранжирования аварий на радиационно опасных объектах // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. №4(4). С. 957-961.

### THE EXPERT-ANALYTICAL TOOL OF THE ANALYSIS OF ACCIDENTS ON RADIATION-DANGEROUS FACILITIES

© 2013 K.I. Ilyin<sup>1</sup>, V.V. Svetukhin<sup>1</sup>, B.B. Kostishko<sup>1</sup>, V.D. Kizin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Technological Research Institute of Ulyanovsk State University

<sup>2</sup>Joint Stock Company «State Scientific Center - Research Institute of Atomic Reactors», Dimitrovgrad

The conducted researches allowed not only to define thin places at implementation of the project of storage of the fulfilled nuclear fuel, but also to define the list of the requirements which execution will allow to operate the specified objects without accident.

On the basis of the analysis statistical given and estimates of experts data on risk of operation of the considered object of storage of the fulfilled nuclear fuel available for today were obtained.

Key words: risk assessment, nuclear and radiation safety, radiation-dangerous objects, radiation accidents, risk matrix.

---

*Kirill Ilyin, Graduate Student at the Physical Material Science Department Ulyanovsk state University.*

*E-mail: kirill40184@list.ru*

*Vyacheslav Svetukhin, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Director. E-mail: slava@sv.uven.ru*

*Boris Kostishko, Graduate Student at the Physical Materials Science Department*

*Victor Kizin, Candidate of Technics, Senior Research Fellow, Chief of Laboratory of Radiation and Technological Methods and Systems of Department of Radiation Safety.*

*E-mail: niar@niiar.ru*