

В. Г. Батий, В. В. Егоров, Ю. И. Рубежанский

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

ЗАДАЧА ОБ УПРАВЛЕНИИ РАДИАЦИОННЫМИ РИСКАМИ ОБЪЕКТА С РАДИАЦИОННО-ОПАСНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

Представлена общая схема принятия решения по управлению радиационными рисками на объекте с радиационно-опасными технологиями. В качестве примера рассматривается случай аварии в хранилище отработавшего ядерного топлива. При перегрузке внутри здания контейнера с отработавшими тепловыделяющими сборками (ОТВС) происходит его падение и разгерметизация.

Ключевые слова: радиационный риск, управление рисками, радиационная авария, отработавшее ядерное топливо, хранилище, активность, выброс, распространение.

В общем случае при работе радиационно-опасного объекта под риском понимают вероятность причинения вреда жизни или здоровью человека, его имуществу, окружающей среде с учетом тяжести этого вреда. Понятно, что функционирование любого объекта, на котором используются радиационно-ядерные технологии, связано с определенной долей риска. Методология оценки риска воздействия радиационного облучения на состояние здоровья человека начала использоваться в США с 70-х годов прошлого столетия [1]. В настоящее время эта методология широко применяется в большинстве развитых стран мира и рекомендована Всемирной организацией здравоохранения в качестве ведущего инструмента при определении количественного ущерба для здоровья от воздействия ионизирующего излучения.

Подход на основе анализа риска, как некоторой количественной оценки, особенно важен для чернобыльского региона, который значительно загрязнен радиоактивными нуклидами. Поэтому в ИПБ АЭС уже долгое время ведутся работы по анализу риска. В работе [2] предложен общий методологический подход оценки рисков при разработке технологической схемы обращения с радиоактивными отходами объекта «Укрытие». В работах [3, 4] описаны принципы и критерии, положенные в основу анализа потенциальных аварий, проведен анализ радиационных рисков при выполнении работ на объекте «Укрытие», предложена комплексная классификация событий по частоте их возникновения, тяжести радиационных последствий и по величине риска, сформулированы общие принципы управления рисками. В работе [5] описаны процедуры выбора и обоснования проектного набора сценариев критических событий, оценки вероятностей таких событий и доз потенциального облучения.

Общий методический подход

Управление рисками – это действия, связанные с идентификацией и анализом рисков, их мониторингом, с принятием решений, которые направлены на уменьшение до приемлемого уровня отрицательных последствий наступления рискованных событий (защитные мероприятия) и (или) вероятности их реализации (мероприятия по предотвращению).

Радиационная опасность обусловлена наличием источников ионизирующих излучений. Поскольку возможность радиационных поражений от этих источников существует не только при авариях, но и в процессе нормальной эксплуатации, управление радиационными рисками является непрерывным процессом, направленным на уменьшение как потенциального, так и текущего облучения.

Цель управления радиационными рисками можно определить как обеспечение радиационной безопасности персонала и минимизацию воздействия на окружающую природную среду путем установления и поддержания приемлемого уровня рисков при использовании оптимальным образом имеющихся материальных ресурсов (рис. 1).

Решение задачи об управлении рисками включает выполнение следующих этапов:

1. Построение математической модели объекта. Математическая модель должна быть как можно более простой, но такой, чтобы она описывала суть происходящих процес-

© В. Г. Батий, В. В. Егоров, Ю. И. Рубежанский, 2012

сов. Исходным является четкое определение границ объекта моделирования. Это может быть некоторое производство, хранилище или его часть, технологическая операция, некоторая территория и др. На объекте происходят или могут произойти выбросы, сбросы, утечки и т.д. радиоактивных веществ в количествах, которые оказывают или могут оказать воздействие на персонал, население и окружающую среду. Физические и химические свойства этих веществ известны.

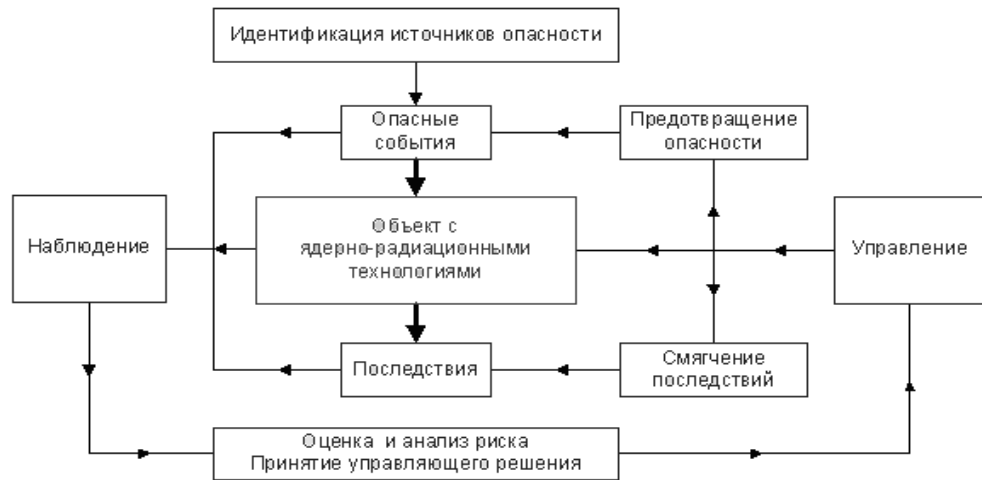


Рис. 1. Общая схема принятия решения по управлению радиационными рисками на объектах с ядерно-радиационными технологиями.

2. *Оценка последствий.* Для описания последствий (негативных последствий) выбирается безразмерная функция, зависящая от выбрасываемой активности или дозы облучения. В последнем случае необходимо провести идентификацию реципиентов и провести моделирование процесса переноса радиоактивных веществ от источника к реципиенту. Например, это может быть модель воздушного (атмосферного) переноса примесей. Далее требуется задать зависимость между опасностью и эффектами (типа «доза - эффект»).

3. *Выбор управления.* Требуется определить (выбрать) управляющие воздействия. Эти воздействия должны иметь возможность меняться в определенных пределах по нашему усмотрению и могут носить технический, эксплуатационный или организационный характер. Кроме того, воздействия могут быть направлены как на предотвращение возникновения аварии, так и на смягчение ее последствий. При выборе воздействий решающее значение имеет их эффективность, степень влияния на риск. В каждом случае требуется разработать математическую модель управляющего воздействия, формализовать его параметры: построить пространство управлений, в котором задать множества допустимых значений (ресурс управления) и т.д.

4. *Выбор наблюдения.* Необходимо построить пространство наблюдений, которое в общем случае включало бы наблюдения за опасными исходными событиями, наблюдения за заданными параметрами объекта и наблюдения за последствиями. Наблюдения должны быть формализованы (например, это могут быть значения некоторых величин в заданном наборе точек в заданные моменты времени) и достаточны.

5. *Цель управления.* Необходимо сформулировать цель управления и для каждого выбранного из допустимого множества управления построить в пространстве наблюдений соответствующий функционал цели.

6. *Идентификация источников опасности.* Проводится анализ потенциальных источников опасности, связанных с эксплуатацией объекта, с деятельностью за пределами объекта и стихийными явлениями. При этом источники опасности оцениваются на основе:

анализа их расположения (задается величина дистанции отбора – наибольшее расстояние от объекта, в пределах которого данное воздействие может представлять опасность);

частоты возникновения (задается уровень отбора по вероятности, начиная с которого событие обязательно должно учитываться).

Результатом анализа является перечень опасных событий. Далее необходимо определить величины воздействия на объект от каждого источника опасности.

7. *Решение задачи оптимального управления.* Решается задача о минимизации функционала цели на множестве допустимых управлений. Находятся управляющие воздействия, для которых функционал цели принимает свое минимальное значение.

Определение рисков

Определение индивидуального радиационного риска. Радиационный риск R – это вероятность возникновения у человека или его потомства какого-либо вредного эффекта в результате облучения (мера вреда для здоровья человека).

Численно радиационный риск для события равен произведению двух величин [6]:

вероятности облучения в единицу времени (год);

вероятности реализации радиологических последствий для здоровья лиц, которые могут стать объектами этого облучения.

При этом вероятности облучения в единицу времени может иметь несколько компонент:

вероятность формирования радиационного воздействия определенного уровня;

вероятность того, что в том месте, где проявляется радиационное воздействие, окажутся люди и т.д.

При оценке безопасности объектов с радиационно-опасными технологиями обычно выделяют риск при текущей эксплуатации (R_T) и аварийный риск (R_A), т.е.

$$R = R_T + R_A.$$

Риск при текущей эксплуатации (R_T) определяется уровнем используемой технологии и не может быть существенно изменен в процессе эксплуатации объекта. При текущей работе объекта происходит облучение персонала. Предприятие может выбрасывать в атмосферу и (или) сбрасывать в водную среду некоторое количество радиоактивных веществ, в результате чего население близлежащих территорий может получить некоторые дозы облучения. Эти дозы обычно определяются выбранной технологией и изначально закладываются на этапе проектирования. Для хорошо разработанного нового проекта величины доз, как правило, оптимальны в смысле баланса затрат-выгод и существенно уменьшать их в процессе эксплуатации экономически не целесообразно.

Задача управления риском R_T становится актуальной, если в результате старения объекта, износа оборудования наблюдается возрастание доз, увеличение вероятности отказов и возникает необходимость в модернизации (частичной модернизации) объекта. Решающими здесь являются стоимостные показатели: имеет ли смысл вкладывать деньги в модернизацию.

Аварийный риск (R_A) связан с возможной реализацией потенциального облучения в результате некоторого частного критического события (ЧКС), критического события (КС) и обусловлен отклонениями от нормальной эксплуатации объекта.

Для того чтобы определить, является ли данное событие (отклонение от нормальной эксплуатации) критическим, необходимо задать определенные критерии изменения радиационной обстановки. Эти критерии устанавливаются из условия непревышения пределов годовых доз облучения, предполагая, что:

при нормальной эксплуатации объекта не будут превышены годовые контрольные уровни (КУ) текущего облучения;

по отношению к одному человеку не может быть реализовано одновременно более одного КС.

Таким образом, КС соответствуют такие изменения радиационной обстановки, которые приводят к дозе потенциального облучения E_A , которая в сумме с дозами облучения при текущей эксплуатации объекта E_T превышает пределы годовых доз.

События по величине радиационной опасности для персонала и населения можно классифицировать следующим образом:

если $E_T + E_A \leq E_{KV}$, нет превышения годовых КУ – нормальные условия работы;

если $E_{KV} < E_T + E_A \leq DL$, т.е. КУ превышаются, но не превышаются допустимые уровни – аварийная ситуация, однако событие не относится к КС;

если $E_T + E_A > DL$, превышаются допустимые уровни – событие является КС.

Здесь E_{KV} – доза, соответствующая КУ; DL – пределы годовой дозы облучения.

Сложный объект (отдельный узел, технологическую операцию и др.) можно представить в виде совокупности K составных элементов (узлов, составных частей, элементарных операций, этапов и т.д.).

Введем следующие обозначения:

f_i – частота отказа (аварии) i -го элемента (узла) объекта, ($i = 1, \dots, K$), $f = (f_1, \dots, f_K)$;
 $s_j = L_j(f)$ – сценарий развития аварии (ЧКС), построенный с учетом логической структуры взаимодействия частей (элементов, узлов) объекта, ($j = 1, \dots, n_s$); $P_j^{(S)}(f)$ – вероятность реализации j -го сценария развития аварии (ЧКС), ($j = 1, \dots, n_s$); $E_j^{(S)}$ – доза потенциального облучения в результате реализации j -го сценария развития аварии (ЧКС), ($j = 1, \dots, n_s$), $E = (E_1, \dots, E_{n_s})$; n_s – общее количество возможных сценариев развития аварии (ЧКС), $n_s < \infty$.

Логическая структура взаимодействия частей (элементов, узлов) объекта определяется выбранной технологией. В этом случае радиационный риск аварийного потенциального облучения R_A можно представить в виде

$$R_A = \sum_{\forall j: E_j \geq E_0} P_j^{(S)}(f) P_C(E_j^{(S)}), \quad (j = 1, \dots, n_s). \quad (1)$$

Здесь $E_0 = DL - E_T$, $P_C(E)$ – вероятность опасных последствий для здоровья человека в результате его облучения дозой E (зависимость "доза – эффект").

Минимизировать аварийный риск R_A можно следующим образом (см. формулу (1)):

1) уменьшая частоту отказов узлов (элементов, частей) объекта – вектор $f = (f_1, \dots, f_K)$ (*мероприятия по предотвращению*);

2) уменьшая дозу потенциального облучения – вектор $E = (E_1, \dots, E_{n_s})$, а вместе с ним и негативные последствия; или изменяя саму зависимость "доза – последствия" $E \rightarrow P_C(E)$ (*защитные мероприятия*).

Мероприятия по предотвращению. Построение логической структуры сценариев развития аварии и оценка вероятности позволяет выделить "слабое звено" в технологической цепочке объекта, частоту отказа которого необходимо оптимизировать в первую очередь. Таким образом, речь идет о частичной модернизации объекта. Основными здесь являются стоимостные показатели, соблюдение баланса затрата-выгода.

Защитные мероприятия. Формирование дозы потенциального облучения при авариях, как правило, происходит не сразу. Процесс растянут во времени, что позволяет использовать защитные (управляющие) мероприятия по уменьшению дозы.

Задача уменьшения дозы при выбросах

Далее, в качестве примера, рассмотрим простейший случай применения *защитных мероприятий* – уменьшение дозы облучения персонала при аварии, связанной с выбросом радиоактивных веществ в воздух внутренних помещений объекта.

Процесс управления будем рассматривать на интервале времени от $t = T_0$ до $t = T$. Здесь $t = 0$ соответствует моменту начала аварии, $t = T_0$ – это момент начала аварийного реа-

гирования. Управлением служит включение-выключение вытяжной вентиляции. Действие вытяжной вентиляции моделируется с граничным условием

$$V_n = V_{ext} f_{ext}(t) \text{ на } \Gamma_{ext}, \quad (2)$$

где V_n – нормальная составляющая вектора скорости; Γ_{ext} – поперечное сечение проемов вытяжной вентиляции; V_{ext} – скорость вытяжки; $f_{ext}(t)$ – заданная функция.

Интервал времени $[T_0, T]$ разобьем на N частей точками $t_i = T_0 + i \frac{(T - T_0)}{N}$, ($i = 0, \dots, N$) и выберем функцию $f_{ext}(t)$ в виде

$$f_{ext}(t) = \sum_{i=1}^N p_i f_{ext}^{(i)}(t),$$

где

$$p_i = const \geq 0, \quad f_{ext}^{(i)}(t) = \begin{cases} 1 & t \in (t_{i-1}, t_i) \\ 0 & t \notin (t_{i-1}, t_i) \end{cases}, \quad (i = 1, \dots, N).$$

Предполагается, что коэффициенты $p_i \geq 0$, ($i = 1, \dots, N$) могут меняться в определенных пределах по нашему усмотрению и служат управлением, $p = (p_1, \dots, p_N) \in K_\partial \subset \mathbf{R}^N$, где K_∂ – множество допустимых управлений.

Для каждого управления $p \in K_\partial$ из решения задачи аэродинамики [7, 8] можно определить объемную активность радиоактивной примеси $A^{(p)}(x_1, x_2, x_3, t)$, $t > 0$ в помещениях объекта.

Доза персонала в результате аварийного выброса пропорциональна объемной концентрации примеси, поэтому в качестве функции цели можно выбрать функционал

$$\Psi(p, t) = \frac{1}{A_0 S} \int_S A^{(p)}(x_1, x_2, h_0, t) dS \quad (3)$$

– среднее значение относительной объемной активности примеси по площади S некоторого помещения объекта на высоте h_0 от поверхности пола (обычно $h_0 = 1,5$ м).

Задача оптимального управления в рассматриваемом случае состоит в следующем. Для данного временного интервала $[T_0, T]$ необходимо найти такое допустимое управление, при котором относительная объемная активность примеси Ψ принимает наименьшее возможное значение, т. е. требуется найти такой вектор \tilde{p} , чтобы

$$\tilde{p} \in K_\partial, \quad \Psi(\tilde{p}, t=T) \leq \Psi(p, t=T) \quad \forall p \in K_\partial. \quad (4)$$

Заметим, что задача (4) может иметь несколько решений.

Приведенные ниже расчеты проводились для модельной задачи. Рассматривался случай аварии, связанной с падением и последующей разгерметизацией контейнера с ОТВС при перегрузке внутри здания хранилища отработавшего ядерного топлива (ХОЯТ-2) ЧАЭС (рассматривался один из возможных вариантов реализации проекта) [8].

Использовалась упрощенная геометрическая модель расположения помещений, которые были представлены своим плоским сечением (рис. 2). Габаритные размеры всего здания составляют 26×17 м. Слева и справа расположены откатные ворота (высотой 5 м), сверху – проем для принудительной вентиляции (1,2 м).

Рассматривался следующий сценарий аварии: контейнер падает с высоты 8 м, в результате повреждения контейнера и части ОТВС происходит выход активности, входные и выходные откатные ворота (см. рис. 2) открыты.

Управление осуществляется включением-выключением в определенные моменты времени вытяжной вентиляции, расположенной сверху помещения 1 (см. рис. 2).

Точно так же, как это было сделано в работах [7, 8], решение задачи разбивалось на несколько этапов. Решения, найденные на каждом из этапов, используются как начальные условия на последующих этапах.

На первом этапе решалась задача об обтекании здания объекта ветровым потоком, рассчитывались поля скоростей, температур и давлений.

На втором этапе решалась задача об установившемся движении воздушного потока во внутренних помещениях объекта (естественная вентиляция).

На третьем этапе рассматривалось падение и разрушение контейнера. При этом газоаэрозольный выброс из ОТВС будет попадать в возмущенный воздушный поток, вызванный движением контейнера. Задача о падении контейнера (цилиндрическое тело) решалась в постановке Лагранжа - Эйлера. На стенах движущего контейнера и на стенках здания задаются условия прилипания (скорость воздуха равна скорости движения тела или нулю).

На рис. 3 – 5 показаны значения скорости движения воздушных потоков в различные моменты времени свободного падения контейнера.

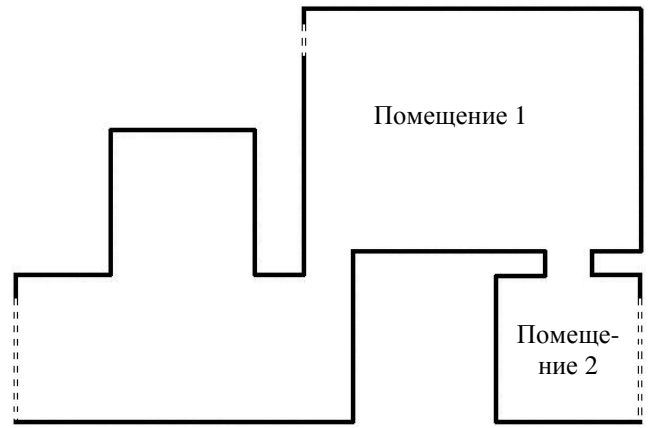


Рис. 2. Геометрическая модель помещений задания ХОЯТ.

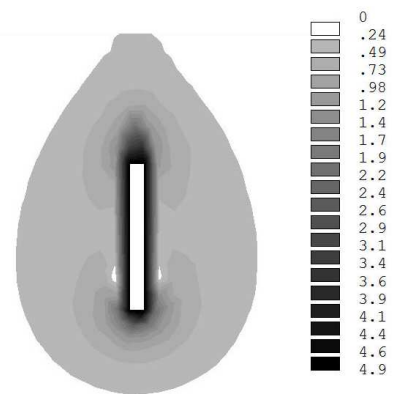


Рис. 3. Скорости движения воздуха (м/с) в момент времени $t = 0,5$ с при свободном падении контейнера.

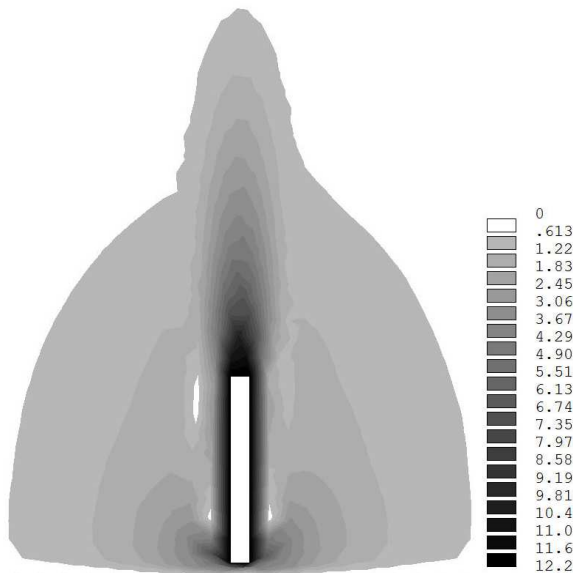


Рис. 4. Скорости движения воздуха (м/с) в момент времени $t = 1,25$ с при свободном падении контейнера.

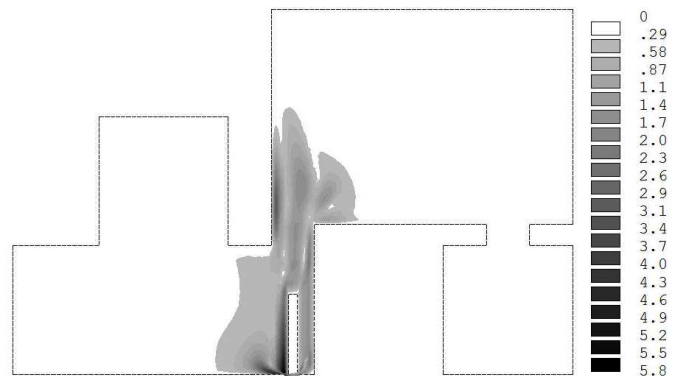


Рис. 5. Скорости движения воздушных потоков (м/с), $t = 2,25$ с (1 с после момента падения контейнера).

Далее решается задача переноса радиоактивных веществ воздушным потоком во внутренних помещениях объекта. И на последнем этапе решается задача (4) о минимизации функционала Ψ (среднего значения относительной объемной активности примеси)

в помещении 2 объекта на временном интервале $T = 120$ с (с момента начала аварии) с помощью включения-выключения вытяжной вентиляции (объемный расход вытяжки не более $12 \text{ м}^3/\text{с}$).

Некоторые из полученных результатов приведены на рис. 6.

Как видно из рисунка, в первом случае (пунктирная кривая) вытяжка включается слишком поздно, с задержкой 10 с после падения контейнера.

Оптимальные параметры работы вытяжной вентиляции в рассматриваемом случае следующие: вытяжка должна включиться на 5-й секунде после выхода активности и продолжительность ее работы должна составлять 36 с. При этом следует отметить, что эта задача имеет несколько решений.

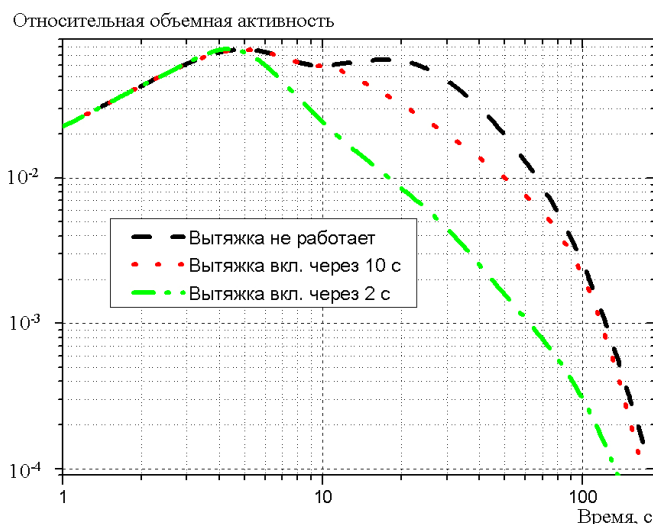


Рис. 6. Среднее значение относительной объемной активности в помещении 2 на высоте 1,5 м от поверхности пола. Вытяжка работает 60 с.

Выводы

Проведенные расчеты показали, что принятая методика расчета достаточно полно описывает динамику распространения примесей во внутренних помещениях объекта с радиационно-опасными технологиями.

Методика является хорошей основой для оценки эффективности систем аварийной принудительной вентиляции и разработки системы управления протеканием аварии. Позволяет минимизировать радиационные воздействия на персонал, население и окружающую природную среду.

Полученные результаты могут найти применение на действующих объектах атомной энергетики в процессе обращения с опасными ядерными, радиоактивными и химическими материалами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хенли Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
2. Батий В.Г., Рудько В.М., Рубежанский Ю.И. Методология оценки рисков при разработке технологической схемы обращения с РАО объекта «Укрытие» // Тез. докл. на Междунар. конф. "Экология предприятий ядерной энергетики". Одесса, 21 - 24 сент. 1998 г. - С. 73.
3. Батий В.Г., Кочнев Н.А., Рубежанский Ю.И. и др. Анализ радиационных рисков, связанных потенциальными авариями, при выполнении стабилизационных мероприятий на объекте "Укрытие" // Проблемы Чернобиля. – 2000. - Вип. 6. - С. 63 - 69.
4. Батий В.Г., Рубежанский Ю.И., Рудько В.М., Стоянов А.И. Классификация и управление радиационными рисками при проведении работ на объекте "Укрытие" // Там же. – 2002. - Вип. 11. - С. 34 - 40.
5. Батий В.Г., Егоров В.В., Ключников А.А. и др. Анализ потенциального облучения персонала в процессе реализации проекта по стабилизации объекта "Укрытие" // Там же. – 2004. - Вип. 14. - С. 34 - 42.
6. НРБУ-97/Д-2000 Нормы радиационной безопасности Украины. Дополнение: Радиационная защита от источников потенциального облучения.
7. Батий В.Г., Егоров В.В., Рубежанский Ю.И. Расчет концентрации радиоактивных аэрозолей вблизи объекта «Укрытие» на основе уточненных компьютерных моделей // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. - 2006. - Вип. 4. - С. 69 - 75.
8. Батий В.Г., Егоров В.В., Рубежанский Ю.И. Математическое моделирование процесса распространения радиоактивных аэрозолей внутри радиационно-опасных объектов // Там же. - 2007. - Вип. 7. - С. 55 - 61.

В. Г. Батій, В. В. Єгоров, Ю. І. Рубежанський

**ЗАДАЧА ПРО КЕРУВАННЯ РАДІАЦІЙНИМИ РИЗИКАМИ
ОБ'ЄКТА З РАДІАЦІЙНО-НЕБЕЗПЕЧНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ**

Представлено загальну схему приймання рішення з керування радіаційними ризиками на об'єкті з радіаційно-небезпечними технологіями. Як приклад розглядається випадок аварії у сховищі відпрацьованого ядерного палива, пов'язаний із падінням і подальшою розгерметизацією відпрацьованої тепловиділяючої збірки при перевантаженні всередині будівлі.

Ключові слова: радіаційний ризик, керування ризиками, радіаційна аварія, відпрацьоване ядерне паливо, сховище, активність, викид, поширення.

V. G. Batiy, V. V. Yegorov, Yu. I. Rubezhansky

**THE PROBLEM OF RADIATION RISKS MANAGEMENT
AT THE OBJECT WITH RADIATION-HAZARDOUS TECHNOLOGIES**

The general scheme of decision-making on a radiation risks management at an object with radiation-hazardous technologies is presented. As an example, the case of an accident in the spent fuel storage associated with a fall and subsequent loss of integrity of the spent fuel assembly in case of overload inside the building for is considered.

Keywords: radiation risk, risk management, radiation accident, spent fuel, storage, activity, release, spread.

Поступила в редакцію 10.01.12