

4. Севаньяев А.В., Герасименко В.Н. Сравнительная частота aberrаций хромосом в культуре лимфоцитов человека в зависимости от режима нейтронного облучения. — Радиобиология, 1988, т. 28, вып. 3, с. 264—266.
5. Hall E., Brenner D. The dose-rate effect revisited: radiobiological considerations of importance in radiotherapy. — Radiation Oncology Biol. Phys., 1991, v. 21, p. 1403—1414.
6. Гулевич А.В., Пашин Е.А. Результаты расчета эффективности блока безопасности и биологической защиты реактора БАРС-6: Препринт ГНЦ РФ — ФЭИ, № 56-18/09, 1996.
7. Литвинов В.И., Мельников В.С., Кошмяков В.П. Использование активационных детекторов из никеля для определения флюенсов нейтронов и мониторингирования энерговыделения установки БАРС-6. РФЯЦ — ВНИИМФ, № ПС 92.5054, 1991.
8. Фокин Г.Н., Овчинников С.А. Измерение флюенса нейтронов и энерговыделения в импульсе установки БАРС-6 активационными детекторами из никеля. ГНЦ РФ — ФЭИ, инв. № 36-03/29, 1994.
9. Дозиметр гамма-излучения ИКС-А. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ИКС-0-00-03ТО. Институт биофизики Минздрава СССР, 1979.
10. Золотухин В.Г., Кеирим-Маркус И.Б., Кочетков О.А. и др. — В кн.: Тканевые дозы нейтронов в теле человека. М.: Атомиздат, 1972, с. 16—17.
11. Соколов В.А., Потетня В.И., Макаров Г.Ф. Изучение физико-дозиметрических характеристик нейтронов с помощью бактериальных тест-систем. Третий съезд по радиационным исследованиям. Москва, 14—17 октября 1997. Тез. докладов. Пушино, 1997, т. II, с. 61—62.
12. Жербин К.А., Капчигашев С.П., Коноплянников А.Г. и др. Биологические эффекты нейтронов разных энергий. М.: Энергоатомиздат, 1984, с. 144.
13. Obaturov G.M., Moiseenko V.V., Filimonov A.S. Model of mammalian cell reproductive death. I. Basic assumptions and general equations. — Radiat. Environ. Biophys., 1993, v. 32, p. 285—294.
14. Obaturov G.M., Filimonov A.S., Moiseenko V.V. Model of mammalian cell reproductive death. II. Comparison with experimental data and discussion. — Ibid., p. 295—310.
15. Дуба В.В., Капчигашев С.П., Обатуров Г.М., Питкевич В.А. Поглощение энергии нейтронов в поверхностных слоях тканезэквивалентного вещества. — Радиобиология, 1979, т. 19, № 6, с. 893—897.
16. Севаньяев А.В. Радиочувствительность хромосом лимфоцитов человека в митотическом цикле. М.: Энергоатомиздат, 1987, с. 79—86.
17. Hall E., Miller R. The influence of the temporal distribution of dose in radiation induced oncogenic transformation in vitro. — In: Proc. 7th Symp. on Microdosim. (8—12 Sept. 1980), Oxford, 1980, p. 69—80.

Поступила в Редакцию 2.09.98

УДК 621.039:656(001.8)

ПРОГНОЗ ВЕРОЯТНОСТИ АВАРИИ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Радаев Н.Н. (Военная академия РВСН им. Петра Великого)

Требования к безопасности радиационно опасных объектов, анализ вариантов их конструктивного построения, оценка последствий возможных аварий и планирование мероприятий по защите населения базируются на данных о вероятности аварии. Наиболее опасным этапом жизненного цикла радиационно опасного объекта является транспортирование. Радиационные аварии при перевозках возможны в тех случаях, когда аварийная нагрузка, возникающая при аварии транспортного средства, превышает прочность упаковок перевозимых объектов. Так, в США были случаи схода с рельсов специальных поездов, перевозивших радиоактивные вещества, и их столкновения с другими поездами [1], что создавало предпосылки для радиационных аварий.

Для оценки интенсивности аварий при перевозке радиационно опасных объектов естественно использовать их статистику. Однако в нашей стране за все время перевозок таких объектов благодаря эффективным организационно-техническим мерам радиационных аварий не было. В Великобритании за 37 лет перевозок радиоактивных материалов незначительные радиационные последствия имели место только в 5% всех аварий и инцидентов, при этом на железнодорожный транспорт приходится лишь 24%

всех инцидентов, из которых непосредственно на этап транспортирования — 43% [2]. Но это отнюдь не исключает возможности радиационных аварий в будущем.

Рассмотрим случай перевозки радиационно опасных объектов наиболее безопасным видом транспорта — железнодорожным, на который приходится основной объем перевозок. Если предположить, что случайная величина числа радиационных аварий при фиксированном объеме перевозок распределена по закону Пуассона, то объем перевозок до первой аварии (между авариями) распределен по экспоненциальному закону [3]. Точечную оценку интенсивности радиационных аварий по объему безаварийных перевозок получить невозможно. При отсутствии радиационных аварий выражения для доверительных границ их интенсивности в плане наблюдений $[N, R, T]$, $[N, M, T]$ имеют вид [4]

$$\lambda_{0*} = 0; \lambda_0^* = r_0/S, \quad (1)$$

где S — суммарный объем перевозок радиационно опасных объектов за все время их эксплуатации, поездо-км. Коэффициент r_0 определяется из таблиц [4] и для односторонней доверительной вероятности $\gamma = 0,9$ равен 2,3. Если принять $S = 10^8$ поездо-км, то по уравнению (1) получим $\lambda_0^* = 2,3 \cdot 10^{-8}$ поездо-км $^{-1}$. Это означает, что усредненная за весь период перевозок по всем типам радиационно опасных объектов интенсивность аварий с доверительной вероятностью $\gamma = 0,9$ находится в интервале $(0, 2,3)10^{-8}$ поездо-км $^{-1}$.

Интенсивность радиационных аварий конкретного объекта зависит, кроме того, от особенностей его конструкции. Для ее оценки воспользуемся статистикой транспортных аварий обычных поездов, пересчитанной на условия перевозки специальными эшелонами и учитывающей перерастание транспортных аварий в радиационные. Под радиационной аварией будем понимать событие, связанное с выходом радиоактивных веществ за установленные барьеры.

Целью статьи является получение математических моделей для прогноза интенсивности и вероятности радиационных аварий при перевозке конкретных радиационно опасных объектов железнодорожным транспортом на основе информации о свойствах их конструкции и статистики транспортных аварий.

Постановка задачи. Рассмотрим определенный тип объектов, которые перевозят по железной дороге специальными эшелонами с принятием особых мер безопасности (одинаковых для всех объектов), снижающих аварийность. Объем перевозок составляет S_0 поездо-км в год. Интенсивность аварий на железных дорогах, сопровождающихся действием аварийных нагрузок на перевозимые грузы (столкновения с другим поездом, сход подвижного состава и т.п.), составляет λ_1 , поездо-км $^{-1}$. Так, в ФРГ в 1989—1993 гг. столкновения и сходы подвижных составов (всех типов) с рельсов происходили с интенсивностью около $3 \cdot 10^{-6}$ поездо-км $^{-1}$ [5]. Найдем соотношения для вычисления интенсивности λ_0 радиационных аварий со специальными эшелонами, перевозящими рассматриваемые объекты.

Авария со специальным эшелоном. Радиационная авария наступает в случае реализации двух событий:

транспортной аварии со специальным эшелоном, которая вызывает аварийные нагрузки на объекты, зависящие от скорости эшелона в момент аварии;

разрушения объектов в результате действия реализовавшихся аварийных нагрузок, что связано с выходом радиоактивных веществ за установленные барьеры.

Вероятность первого события вычисляется через интенсивность λ_{01} транспортных аварий со специальным эшелоном. Будем полагать, что $\lambda_{01} = \alpha \lambda_1$, где α — коэффициент эффективности принимаемых организационно-технических мер по снижению аварийности при перевозке специальных грузов (может быть оценен экспертным методом).

Тогда вероятность хотя бы одной транспортной аварии в год со специальным эшелонem, создающей предпосылку для радиационной аварии, вычисляется по формуле $Q_{т.а} = 1 - \exp(-\alpha\lambda_1 S_0)$.

Пусть условием разрушения объекта и выхода радиоактивных веществ за установленные барьеры является $V_d > V_n$, где V_d — скорость поезда в момент аварии, характеризующая действующую на перевозимый объект аварийную нагрузку; V_n — предельная скорость столкновения, при которой объект еще не разрушен. Величины V_d , V_n являются случайными и характеризуются своими функциями распределения.

Предельная скорость характеризует свойство конструкции радиационно опасных объектов — его устойчивость по отношению к ударным механическим нагрузкам, возникающим при транспортных авариях. Предельная скорость зависит от прочности упаковки (контейнера), способа крепления, вида транспортной аварии, расположения вагона в составе и других факторов. Для взрыво- и радиационно опасных объектов величина V_n зависит также от чувствительности входящих в состав объекта взрывчатых веществ. Для оценки предельной скорости используют расчетно-экспериментальные методы. Виды (например, ударные механические нагрузки, перегрузки на узлах крепления, проникающие воздействия острых деталей соседних грузов) и параметры аварийных воздействий на радиационно опасные объекты в зависимости от скорости движения поезда, расположения вагона в составе и других факторов устанавливают с помощью моделей аварий транспортных средств. Несущая способность конструкции объекта по отношению к воздействиям, реализующимся в транспортной аварии, определяется экспериментально. Для этого объекты испытывают на действие механической аварийной нагрузки (на сбрасывание, пробивание и др.).

С учетом условной вероятности $q = P(V_d > V_n)$ радиационной аварии при реализации транспортной аварии с поездом, движущимся со скоростью V_d , запишем выражение для безусловной вероятности радиационной аварии:

$$Q = Q_{т.а} q = [1 - \exp(-\alpha\lambda_1 S_0)] P(V_n < V_d). \quad (2)$$

При вычислении вероятности второго события следует иметь в виду, что случайные величины V_n и V_d стохастически независимы. Случайную величину предельной скорости можно считать распределенной по нормальному закону $V_n \in N(\nu_n, \sigma_n^2)$ со средней скоростью ν_n и среднеквадратичным отклонением σ_n .

Анализ распределения скорости в момент происшествия на железных дорогах ФРГ в 1989—1993 гг. показывает, что большая их часть происходит в пределах станций при маневровых работах, а не на перегонах, т.е. при малой скорости. Поэтому распределение аппроксимируется законом Вейбулла $V_d \in W(a, b)$ с параметрами масштаба $a = 25,7$ и формы $b = 0,75$. Можно предположить, что для железных дорог разных стран распределение происшествий по скорости отличается лишь масштабом. Для российских железных дорог параметр масштаба подобного распределения существенно меньше, так как нет скоростных магистралей. Параметры же формы распределения близки. Аналогичное предположение может быть сделано и относительно других количественных соотношений между аварийными происшествиями. Указанные предположения позволяют при построении математических моделей использовать детальную статистику аварий в ФРГ, Швейцарии, Австрии и других странах.

Запишем выражение для вероятности радиационной аварии в год со специальным эшелонem при объеме перевозок S_0 :

$$Q = 1 - \exp(-\lambda_0 S_0). \quad (3)$$

Приравняв уравнения (2), (3) и предположив, что произведения $\alpha\lambda_1 S_0$ и $\lambda_0 S_0$ малы, получим $\lambda_0 = \alpha\lambda_1 P(V_n < V_d)$.

Выражение для вычисления вероятности $P(V_n < V_d)$ в случае композиции нормального закона и распределения Вейбулла приведено в работе [6]. Если пренебречь случайным разбросом предельной скорости (дисперсии скоростей $D[V_n] \ll D(V_d)$, $V_n \equiv v_n$ — средней предельной скорости), то

$$\lambda_0 = \alpha\lambda_1 \exp[-(v_n/a)^b] = \alpha\lambda_1 \exp[-(K_b\eta)^b], \quad (4)$$

где $\eta = v_n/v_d$ — коэффициент запаса радиационно опасного объекта по безопасности; $v_d = K_b a$ — математическое ожидание скорости поезда в момент аварии; K_b — табулированный коэффициент (для статистики ФРГ равный 1,2).

Расчеты показывают, что с ростом коэффициента запаса интенсивность радиационных аварий снижается по отношению к интенсивности транспортных аварий (при $\eta = 0,05$ на 10%, при $\eta = 2,5$ — в 10 раз). Снижение λ_0 проходит значительно при меньших разбросах действующей и предельной скорости. Таким образом, интенсивность радиационных аварий может быть снижена двумя путями: уменьшением средней скорости движения специального эшелона (что возможно в ограниченных пределах) и увеличением предельной скорости для радиационно опасных объектов за счет повышения устойчивости их конструкции (что имеет свои экономические и технические пределы).

Авария со встречным поездом. При значительных коэффициентах запаса по безопасности (предельной скорости v_n при фиксированных значениях v_d), характерных для устойчивости современных радиационно опасных объектов (предельная скорость до 200 км/ч), интенсивность радиационных аварий, которые обусловлены аварией с эшелоном, становится пренебрежимо малой. Так, во всех зафиксированных аварийных ситуациях со специальными поездами радиационные аварии не реализовались [1]. Поэтому рассмотрим более редкие ситуации фронтального столкновения и транспортной аварии со встречным поездом в момент прохождения специального эшелона, которые характеризуются более высокой относительной скоростью столкновения и, следовательно, при той же предельной скорости меньшими коэффициентами запаса. Это, в свою очередь, приводит к увеличению вероятности второго события.

Исключим фронтальные столкновения со специальными эшелонами, так как их вероятность мала, а за счет принятия организационных мер становится пренебрежимо малой. Так, в ФРГ в 1989—1993 гг. столкновения подвижного состава составляли 22% всех аварийных происшествий, доля наиболее опасных фронтальных столкновений не превысила 1,7% столкновений подвижного состава, из них лишь 9,2% происходили на перегонах, т.е. при большой скорости [5].

Пусть радиационно опасные объекты перевозят по двухпутной магистрали с двусторонним движением поездов. Тогда аварийная ситуация со специальным эшелоном, движущимся со средней скоростью v_0 , возможна при сходе на него движущегося со средней скоростью v_1 встречного поезда. В этом случае средняя относительная скорость поездов составит $v'_d = v_0 + v_1$, что означает снижение коэффициента запаса по безопасности (v'_d становится соизмеримой со средней предельной скоростью столкновения v_n , при которой реализуется радиационная авария). Частота следования поездов на маршруте перевозки составляет f пар/ч и не снижается при прохождении специального эшелона. Длина встречного поезда равна x_1 , специального эшелона x_0 (км). Будем полагать, что для транспортных аварий на перегонах, создающих опасность для встречных специальных эшелонов, интенсивность $\lambda_{02} = \beta\lambda_1$. Так, на германских железных

дорогах сходы подвижного состава с рельсов в 1989—1993 гг. составляли 20% аварийных происшествий, при этом на перегонах произошло только 3,3% сходов [5]. Консервативно полагая, что любой сход создает угрозу для встречного состава, получим $\beta = 0,2 \cdot 0,033 \approx 0,01$. Пусть время в пути специальных эшелонов в год составляет $T_0 = S_0/\nu_0$ поездо-час. Тогда число встречных поездов на пути движущихся специальных эшелонов в год достигнет $n_1 = f(1 + \nu_0/\nu_1)T_0$.

Будем полагать, что в случае аварии скорость встречного поезда мгновенно снижается до нуля, а специальный эшелон экстренно тормозит до безопасной с точки зрения радиационной аварии скорости на пренебрежимо малом по сравнению с длиной эшелона пути. При сделанных допущениях радиационная авария возможна только в случае, когда специальный эшелон разъезжается с встречным составом в момент его аварии. Так как суммарная протяженность составов составляет $x = x_0 + x_1$, то потенциально опасная часть объема перевозок в год, на которой возможны радиационные аварии, составляет

$$S_1 = n_1 x = f \left(1 + \frac{\nu_0}{\nu_1} \right) \frac{S_0 x}{\nu_0} \text{ поездо-км.}$$

Отсюда вероятность хотя бы одной транспортной аварии в год, создающей предпосылку для радиационной аварии, вычисляется по формуле $Q_{\text{т.д}} = 1 - \exp(-\beta \lambda_1 S_1)$, вероятность радиационной аварии —

$$Q = [1 - \exp(-\beta \lambda_1 S_1)] P(V_{\text{д}} < V'_{\text{д}}), \quad (5)$$

где $V'_{\text{д}} = V_0 + V_1$ — случайная относительная скорость состава в момент аварии; V_0 , V_1 — скорость специального эшелона и встречного поезда на перегонах.

Для определения вариации скорости движения поездов на перегонах определенных маршрутов будем рассматривать зависимости $V_0(t)$ и $V_1(t)$ как стационарные случайные процессы. По достаточно протяженным реализациям этих процессов, получаемым со скоростемерных лент, можно определить [7] среднюю скорость ν_0 , ν_1 и дисперсию $D[V_0] = \sigma_0^2$, $D[V_1] = \sigma_1^2$. Анализ показывает, что $V_0 \in N(\nu_0, \sigma_0^2)$ и $V_1 \in N(\nu_1, \sigma_1^2)$, т.е. случайные величины V_0 , V_1 распределены по нормальному закону.

Выражение (5) для вероятности радиационной аварии в год со специальным эшелоном, обусловленной наездом встречного поезда, можно записать в виде, аналогичном уравнению (3). Тогда составляющая интенсивности радиационных аварий со специальным эшелоном, обусловленных наездом встречного поезда, поездо-км $^{-1}$, запишется в виде

$$\lambda_0 = \frac{\beta \lambda_1 x f (1 + \nu_0/\nu_1)}{\nu_0} \Phi \left\{ \frac{\nu_0 + \nu_1 - \nu_{\text{п}}}{\sqrt{\sigma_{\text{д}}^2 + \sigma_{\text{п}}^2}} \right\}, \quad (6)$$

где $\Phi(\cdot)$ — функция Лапласа; $\sigma_{\text{д}}^2 = \sigma_0^2 + \sigma_1^2 + 2\rho\sigma_0\sigma_1$; σ_0 , σ_1 — среднеквадратичное отклонение скорости специального эшелона и встречных поездов в момент аварии; ρ — коэффициент корреляции случайных величин V_0 , V_1 (близок к 1). Когда V_0 , V_1 не коррелированы ($\rho = 0$), $\sigma_{\text{д}}^2 = \sigma_0^2 + \sigma_1^2$. При $\rho = 1$ $\sigma_{\text{д}}^2 = (\sigma_0 + \sigma_1)^2$.

Интенсивность радиационных аварий уменьшается при снижении аварийности на железных дорогах, ограничении интенсивности и скорости движения встречных поездов при прохождении специального эшелона, увеличении прочности радиационно опасных объектов, характеризуемой предельной скоростью $\nu_{\text{п}}$. Анализ выражений (4), (6) показывает, что с увеличением $\nu_{\text{п}}$ интенсивность радиационных аварий по причине аварий встречных поездов начинает превалировать над интенсивностью радиационных аварий из-за аварий самого специального эшелона.

Авария по причине природных явлений. Транспортная авария со специальным эшелоном может быть инициирована также природными явлениями (оползнями, землетрясениями, ураганами и др.). Рассмотрим для примера риск радиационной аварии при проезде специальным эшелоном сейсмически опасного района с землетрясением интенсивностью 7 баллов и более [8] и магнитудой $M = 5$. В Дальневосточном регионе России такая зона занимает около 40% территории областей, по которым проходит Транссибирская магистраль, что приводит к появлению опасности для движения на соответствующих участках магистрали.

Пусть в рассматриваемом районе протяженностью l_0 , км среднее время между сильными землетрясениями равно T_{cp} , лет. Местоположение зоны повреждения пути средней протяженностью l_n , км распределено равномерно по длине маршрута. В качестве l_n можно принять размер 7-балльной зоны, который возрастает с 10 (для $M = 5$) до 140 км (для $M = 8$). Число эшелонов, проходящих со средней скоростью v_0 , км/ч через сейсмически опасный район, составляет в год $n = \chi S_0 / l_0$, где χ — доля объема перевозок, осуществляемого через сейсмически опасные районы. Будем полагать, что сразу после начала землетрясения проводится экстренное торможение эшелона, причем тормозной путь намного меньше l_n .

Авария произойдет в случае совместной реализации следующих независимых событий:

землетрясения с магнитудой $M > 5$. В первом приближении поток сильных землетрясений можно считать пуассоновским. Тогда вероятность события вычисляется как вероятность хотя бы одного землетрясения в год $Q_1 = 1 - \exp(-t/T_{cp}) \approx t/T_{cp}$;

нахождения специального эшелона в сейсмически опасном районе в момент землетрясения. Вероятность события можно оценить по формуле $Q_2 = T_0 / (365 \cdot 24)$, где $T_0 = n t_0$, ч — время следования в пути специального эшелона через сейсмически опасную зону; $t_0 = l_0 / v_0$ — время проезда сейсмически опасной зоны эшелоном;

нахождения специального эшелона в зоне повреждения пути в момент землетрясения. Вероятность этого события вычисляется по формуле $Q_3 = l_n / l_0$.

Тогда вероятность аварии со специальным эшелоном в год оценивается по формуле $Q_{та} = Q_1 Q_2 Q_3 = 1,14 \cdot 10^{-4} \chi S_0 l_n / (T_{cp} v_0 l_0)$. С учетом выражения (3) составляющая интенсивности радиационных аварий вследствие землетрясений вычисляется по формуле $\lambda_0 = 1,14 \cdot 10^{-4} \chi l q / T_{cp} v_0 l_0$. В общем случае по полученной формуле следует суммировать интенсивность аварий при проезде отдельных районов с разной сейсмической опасностью. Зоны повышенной сейсмической опасности занимают около 20% территории России, в том числе 5% — чрезвычайно опасные 8—9-балльные зоны. В первом приближении долю χ объема перевозок радиационно опасных объектов через сейсмически опасные районы можно принять равной доле этих районов в территории страны.

Приложения. Просуммировав интенсивность радиационных аварий по разным причинам, можно по выражению (3) получить оценку вероятности радиационной аварии в год. Учитывая, что $Q \approx \lambda_0 S_0 \approx \lambda_t t_0$ ($t_0 = 1$ год; λ_t — интенсивность радиационных аварий во времени, год⁻¹), среднее время до радиационной аварии при постоянных λ_0 и S_0 $t_{cp} = 1/\lambda_t = 1/(\lambda_0 S_0)$. Если принять безаварийный объем перевозок за 50 лет $S = 10^8$ поезд-км, т.е. в среднем $S_0 = 2 \cdot 10^6$ поезд-км в год, то при неизменных объеме перевозок и интенсивности аварий нижняя оценка среднего времени до радиационной аварии $t_{cp*} = 1/(\lambda_0^* S_0) = 1/(2,3 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^5) \approx 22$ годам. Следовательно,

$t_{\text{ср}} \in (22, \infty)$ годам. Если считать приемлемой одну радиационную аварию в столетие, то при среднем ежегодном объеме перевозок в следующем столетии $S_0 = 10^6$ поездо-км допустимая интенсивность радиационных аварий с учетом коэффициента запаса 0,1 $\lambda_0 \leq 0,1/(t_{\text{ср}} S_0) = 0,1/(100 \cdot 10^6) = 10^{-9}$ поездо-км $^{-1}$.

Задавшись прогнозируемым значением аварийности на транспорте и условиями перевозок, можно определить необходимую величину η — коэффициент запаса радиационно опасного объекта по безопасности. При повышении эффективности принимаемых мер по уменьшению аварийности снижаются требования к прочности объекта (уменьшается необходимая величина η).

Вероятность радиационной аварии за планируемый период T эксплуатации радиационно опасных объектов можно получить по формуле $Q(T) = 1 - \exp(-\lambda_i T)$.

Основываясь на интенсивности радиационных аварий конкретных типов объектов и планируемом объеме перевозок в год, можно сравнить степень их опасности путем вычисления вероятности радиационной аварии в год либо среднего времени между авариями (до аварии). Более полное сравнение может быть сделано с учетом последствий P_i радиационных аварий каждого i -го объекта. В качестве показателя опасности в этом случае можно использовать математическое ожидание последствий в год $M[P_i] = Q_i \times P_i$, где Q_i — вероятность радиационной аварии в год объекта i -го типа [9].

На стадии разработки конструкции радиационно опасного объекта и выбора мер по обеспечению радиационной безопасности населения в качестве целевой функции целесообразно использовать суммарные затраты на разработку и ликвидацию последствий возможных аварий, которые могут произойти за планируемый период эксплуатации T : $C_i = C_p(\eta_i) + Q_i(T)P_i$, где $C_p(\eta_i)$ — затраты на разработку и производство i -го варианта объекта с запасом по безопасности η_i .

Оптимизация маршрутов перевозки. Анализ параметров, влияющих на интенсивность радиационных аварий при железнодорожных перевозках, показывает, что возможности ее снижения ограничены. Однако если имеется несколько возможных маршрутов перевозки с различающимися значениями параметров f, λ_1 , протяженности l и др., то вероятность радиационной аварии при перевозке можно снизить рациональным выбором маршрута. В качестве критерия в этой постановке задачи можно принять минимум вероятности радиационной аварии при перевозке по i -му маршруту $Q_i = 1 - \exp(-\lambda_{01} l_i)$.

При более общей постановке задачи рациональный маршрут выбирают с учетом средней плотности населения на маршруте движения специального эшелона, с которой связаны ущерб P от радиационной аварии и затраты на ликвидацию ее последствий. Тогда в качестве критерия целесообразно принять минимум совместных затрат на перевозку объектов и ликвидацию последствий возможных радиационных аварий. Обе составляющие затрат зависят от маршрута: первая — его протяженности l_i , вторая — средней плотности населения на маршруте.

Совместные затраты на i -м маршруте выражаются формулой $C_i = c_0 l_i + P_i Q_i$, где c_0 — стоимостной коэффициент, руб./ (поездо-км); P_i — средний ущерб от радиационной аварии и затраты на ликвидацию ее последствий на i -м маршруте. При расчете P_i следует учитывать политические, экологические, экономические и другие последствия. Для снижения второй составляющей затрат целесообразно ограничивать скорость движения специального эшелона по крупным населенным пунктам, благодаря чему снижается вероятность радиационной аварии в местах, где ущерб от аварии аномально велик.

Маршрут выбирается по условию

$$i^* = \arg \min_i C_i$$

При отсутствии статистических данных об аварийности на железных дорогах можно использовать оценку аварийности в целом по стране λ_1 , а интенсивность аварий на маршрутах рассчитывать по соотношению $\lambda_{1i} = k_i \lambda_1$, где коэффициенты k_i определяют с помощью экспертного оценивания. В общем случае маршруты могут содержать участки с различными значениями f , λ_1 и других параметров.

Таким образом, получены простые вероятностные модели, позволяющие установить степень влияния основных факторов на риск радиационных аварий при перевозке радиационно опасных объектов, оценить его величину и задать требования к ним. Использование моделей в задачах оптимизации позволяет сократить суммарные затраты на разработку и эксплуатацию радиационно опасных объектов.

Выражаю признательность В.Н. Андросюку (МПС РФ) за полезные обсуждения при подготовке статьи и предоставленные материалы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрейман Э.С., Щупановский В.Д., Калашин В.М. Основы безопасной перевозки радиоактивных веществ. М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Wilson C., Shaw K., Hughes J. Accidents and incidents in the transport of radioactive materials — an analysis of 37 years of experience. — In: The 11th Intern. Conf. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM'95), 1995, Las Vegas, USA, p. 1488—1495.
3. Радаев Н.Н. Прогнозирование вероятности аварийной ситуации при транспортировке ядерных объектов. — Атомная энергия, 1996, т. 80, вып. 3, с. 167—174.
4. ГОСТ 11.005-74. Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров экспоненциального распределения и распределения Пуассона. М.: Изд-во стандартов, 1974. 18 с.
5. Херстель Ю. Методика имитационного моделирования для оценок рисков при смешанной эксплуатации железнодорожных участков. Пер. с нем. М., 1997.
6. Капур К., Ламерсон Л. Надежность и проектирование систем. М.: Мир, 1980. 604 с.
7. Жовинский А.Н., Жовинский В.Н. Инженерный экспресс-анализ случайных процессов. М.: Энергия, 1979. 112 с.
8. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
9. Хенли Э., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. М.: Машиностроение, 1981. 526 с.

Поступила в Редакцию 18.09.98

Р е ф е р а т ы с т а т е й

УДК 621.039.519

Адамов Е.О., Ганев И.Х., Лопаткин А.В., Муратов В.Г., Орлов В.В. Показатели реакторов крупномасштабной ядерной энергетики России. — Атомная энергия, 1998, т. 85, вып. 5, с. 351—358.

В рамках проблемы радиационно-миграционного баланса оценена возможность его достижения при обращении с долгоживущими высокоактивными отходами на стадии длительного функционирования крупномасштабной ядерной энергетики России. Проведены расчеты характеристик воспроизводства и выгорания усовершенствованных быстрых реакторов БН-А-800, БРЕСТ-А-300, тепловых типа

ВВЭР-1000 и быстрого реактора-трансмутатора с циркулирующим металлическим топливом БЦМТ. Приведены данные об эквивалентной активности компонентов отходов—актиноидов, конструкционных материалов и продуктов деления, соотношении эквивалентной активности высокоактивных отходов и природного урана и тория, дисбалансе активности при различном времени выдержки. Показаны возможность реакторной трансмутации ^{226}Ra , ^{230}Th и малый вклад активности зон воспроизводства в радиационно эквивалентную активность высокоактивных компонентов отходов быстрого реактора. Рис. 2, табл. 5, список лит. 14 назв.