

УДК 621.039.58

*Р. Т. Исламов<sup>1</sup>, А. А. Деревянкин<sup>1</sup>, И. В. Жуков<sup>1</sup>, М. А. Берберова<sup>1</sup>,  
С. С. Дядюра<sup>2</sup>, Ю. А. Мардашова<sup>2</sup>, Р. Ш. Кальметьев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Международный центр по ядерной безопасности

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

## Оценка риска для атомных электростанций с реакторами типа РБМК и ВВЭР

Проведена сравнительная оценка риска для атомных электростанций с реакторами типа РБМК и ВВЭР. Представлены результаты расчетов показателей риска для паспортов безопасности Курской и Ростовской атомных электростанций, которые в соответствии с Российским законодательством должен иметь каждый опасный объект. Результатом работы является оценка систем показателей риска в натуральных и экономических показателях — диаграммы социального риска ( $F/N$ -диаграммы) и диаграммы материального ущерба ( $F/G$ -диаграммы) для Курской и Ростовской атомных электростанций.

**Ключевые слова:** оценка риска, безопасность, атомная электростанция, реактор, РБМК, ВВЭР, паспорт безопасности.

Безопасность атомных электростанций, как и любых других опасных объектов, имеет стохастическую природу и обусловлена внутренними и внешними явлениями природного и техногенного характера. Вероятностным характеристикам безопасности атомных электростанций соответствуют риски, связанные с авариями на атомных электростанциях и другими чрезвычайными ситуациями техногенного и природного характера с непосредственными и отдаленными последствиями для населения и сверхнормативным загрязнением окружающей среды [1].

В данной статье в качестве примера атомных электростанций с реакторами типа РБМК и ВВЭР рассматриваются соответственно Курская и Ростовская атомные электростанции.

Методология вероятностной оценки риска основана на методологии вероятностного анализа безопасности атомных электростанций [1, 2]. Методический подход, используемый в настоящей статье, основан на модели деревьев отказов и деревьев событий. Он обладает развитой методической базой, обширной базой данных и обеспечен множеством верифицированных расчетных программ. Его основные положения к оценке риска включают: детерминистический анализ безопасности; выявление слабых мест проекта, увеличивающих вероятность повреждения активной зоны; учет мер по управлению авариями и ликвидации последствий аварии; критерии приемлемости риска; разработку мероприятий по повышению безопасности атомных электростанций.

Общая процедура проведения оценок риска включает три последовательные стадии [3].

1) Анализ опасности природного и техногенного характера, ошибок персонала атомных электростанций, отказов оборудования и систем, разрушения зданий и сооружений на атомных электростанциях вследствие внешних и внутренних экстремальных воздействий. Целью анализа является определение вероятностей (частот) радиоактивных выбросов в окружающую среду в соответствии с принятыми категориями потенциальных ущербов (соответствует вероятностному анализу безопасности уровня 1 и уровня 2 для атомных электростанций).

2) Оценка (на основе результатов пункта 1) показателей риска причинения ущерба жизни и здоровью физических лиц (населению и персоналу атомных электростанций), имуществу физических и юридических лиц (населению, эксплуатирующей организации атомных электростанций, другим юридическим лицам) в натуральных показателях в соответствии с принятыми категориями потенциальных ущербов (соответствует вероятностному анализу безопасности уровня 3 для атомных электростанций). Натуральными показателями ущерба

являются дозовые нагрузки; количества детерминированных и стохастических эффектов облучения; концентрации радиоактивных веществ на территории атомных электростанций и за пределами санитарно-защитной зоны.

3) Оценка (на основе результатов пункта 2) показателей риска причинения ущерба жизни и здоровью физических лиц (населению и персоналу атомных электростанций), имуществу физических и юридических лиц в соответствии с принятыми категориями потенциальных ущербов в экономических показателях. Экономическими показателями ущерба являются затраты на превентивные меры по предупреждению или уменьшению потенциального ущерба здоровью населения и персонала атомных электростанций; выплата возмещений в случае смерти, за лечение, потерю имущества физических и юридических лиц.

Для выполнения количественной оценки интегрального (от всех возможных аварий) риска необходимо знать вероятности (частоты) возникновения опасных ситуаций  $F$ , уровень соответствующих опасных воздействий на людей  $D$  (например, возможный уровень доз радиации) и коэффициент  $k$ , связывающий вероятность (частоту) гибели людей с опасными воздействиями (например, гибели от раковых заболеваний при дозе 1 Зв). Тогда интегральный индивидуальный риск определяется по формуле [3]:

$$R = \int kD(x)dF(x) < R_a,$$

где  $x$  — параметр интегрирования;  $R_a$  — нормативный показатель [4].

Целью оценок риска является разработка рекомендаций по повышению безопасности атомных электростанций (управления риском) на основе анализа результатов оценок риска, включающего определение доминантных вкладчиков в риск, анализ значимости, чувствительности и неопределенностей результатов оценки. Основной вклад в риск могут вносить отказ оборудования и систем безопасности, отказ по общим причинам и ошибки персонала. Определение доминантного вкладчика позволяет обозначить наиболее слабые места в проектных решениях и технологических процессах на атомных электростанциях. Значимость вклада в риск атомных электростанций определяется его местом в интегрированной логической структуре модели объекта, а также вероятностью.

Анализ чувствительности проводится для оценки изменения частоты повреждения оборудования атомных электростанций при замене базовых событий вероятностного анализа (действия оператора, работа оборудования и др.). Он позволяет использовать результаты вероятностного анализа как средство исследования возможных мер снижения риска (обосновать финансовые расходы на модернизацию атомных электростанций).

Есть два основных класса неопределенности результатов: вероятностный и детерминистический. Каждый из них в свою очередь подразделяется на два типа: неопределенность параметров модели и неопределенность модели. Неопределенность вероятностной модели может быть оценена с помощью критериев Фишера и Хи-квадрат [2]. Неопределенность параметров вероятностной модели может быть оценена методом аналитико-статистического моделирования [5]. Неопределенность детерминистической модели может быть оценена методом стохастической аппроксимации детерминистической модели [6]. Неопределенность параметров детерминистической модели может быть оценена методами Монте-Карло, латинского гиперкуба и др. [2].

В общем случае анализ риска атомных электростанций для управления их безопасностью заключается в построении множества сценариев возникновения и развития возможных аварий с последующей оценкой частот реализации и определением масштабов последствий каждой из этих аварий. В настоящей статье в рамках разработки паспортов безопасности Курской и Ростовской атомных электростанций риск оценивается для двух сценариев развития аварии — наиболее опасного и наиболее вероятного.

В качестве наиболее опасного сценария для Курской атомной электростанции выбрана авария с инициирующим событием «Потеря технической воды», а для Ростовской атомной электростанции — авария с инициирующим событием «Обесточивание атомной электро-

станции с отказом дизель-генератора и быстродействующей редуccionной установки со сбросом пара в атмосферу».

В качестве наиболее вероятного сценария для Курской атомной электростанции рассмотрена авария с инициирующим событием «Средняя течь по пару», а для Ростовской атомной электростанции — авария с инициирующим событием «Разрыв паропровода в защитной оболочке атомной электростанции с проектной величиной течи в парогенераторе из первого контура во второй».

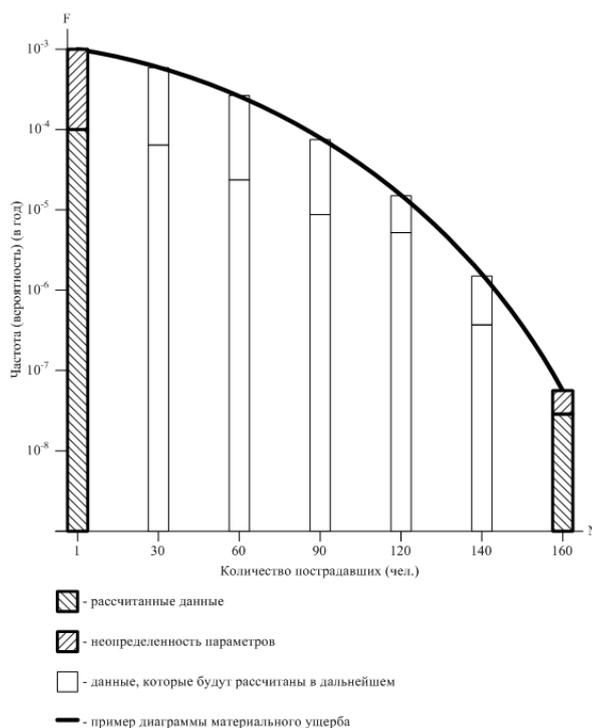


Рис. 1. Пример диаграммы социального риска ( $F/N$ -диаграммы) для Курской атомной электростанции

На основе результатов оценки риска разрабатываются диаграммы социального риска ( $F/N$ -диаграммы) — рис. 1, 2 — и диаграммы материального ущерба ( $F/G$ -диаграммы) — рис. 3, 4.

Для оценки радиационного воздействия аварийных выбросов и планирования аварийных мероприятий использовались количественные показатели зависимости численности населения от расстояния и направления от атомной электростанции. Плотность населения вне 30-километровой зоны принята средней для регионов Курской и Ростовской атомных электростанций.

В расчетах приняты следующие параметры: скорость ветра при аварии соответствует среднегодовой, категория устойчивости погоды по Пасквиллу —  $D$  (нейтральные условия), вымывание радиоактивной примеси из облака отсутствует, шероховатость подстилающей поверхности земли — 0,1 м.

Выброс радиоактивных веществ в окружающую среду считается кратковременным, дополнительный подъем облака, вследствие плавучести, не учитывается. При оценке учитываются три пути облучения населения: от радиоактивного облака, загрязненной поверхности земли и в результате попадания радионуклидов в организм при ингаляции.

Результатом оценки радиационных последствий аварии (для среднестатистического взрослого человека со средней радиочувствительностью) являются: поглощенная и годовая эффективная доза облучения. По значениям этих доз определяется возможность возникновения детерминированных и стохастических эффектов.

Для оценки радиационных последствий на персонал атомной электростанции принято,

что авария происходит в момент начала работы максимальной дневной смены. Под максимальной дневной сменой понимается смена с максимальным количеством персонала, находящегося на площадке атомной электростанции. Для Ростовской атомной электростанции максимальная дневная смена составляет 1620 человек. Для Курской атомной электростанции максимальная дневная смена составляет 3400 человек.

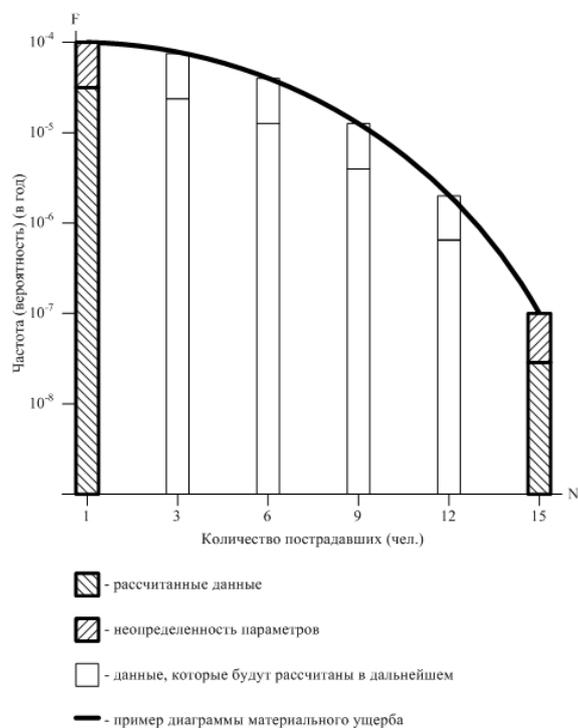


Рис. 2. Пример диаграммы социального риска ( $F/N$ -диаграммы) для Ростовской атомной электростанции

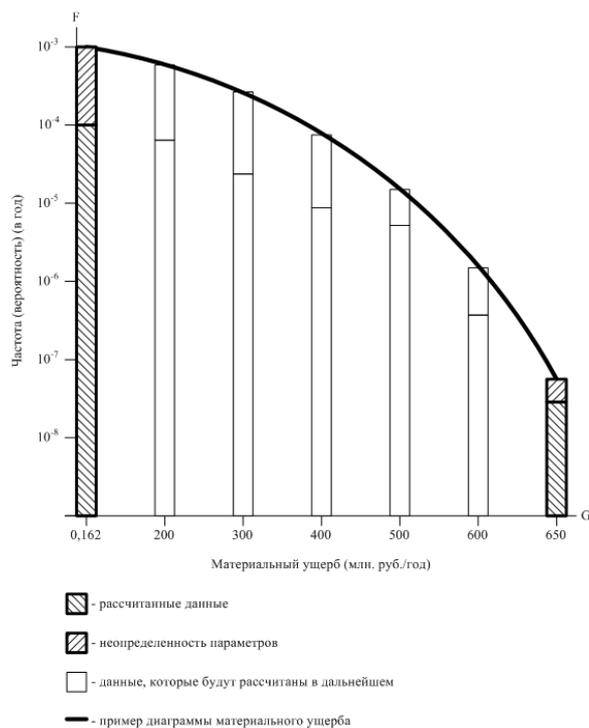


Рис. 3. Пример диаграммы материального ущерба ( $F/G$ -диаграммы) для Курской атомной электростанции

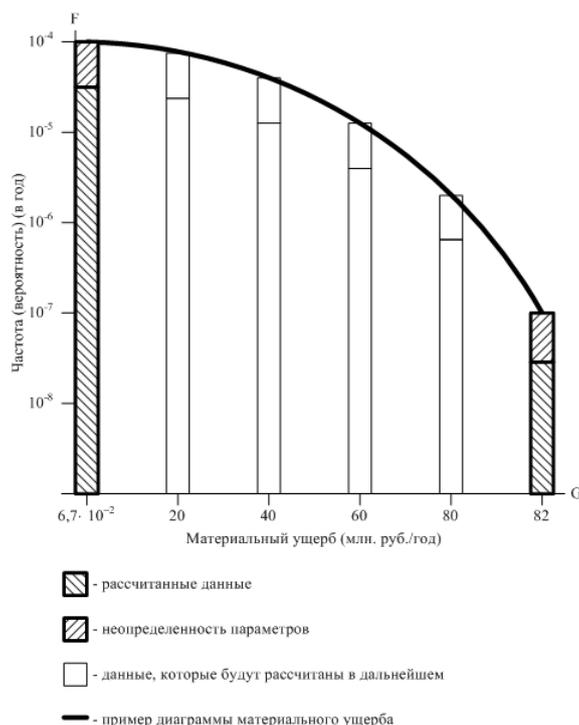


Рис. 4. Пример диаграммы материального ущерба ( $F/G$ -диаграммы) для Ростовской атомной электростанции

При оценке показателей риска аварии на Курской и Ростовской атомных электростанциях рассмотрены только ядерные и радиационные факторы. Последствия пожаро- и взрывоопасных рисков, а также токсических рисков не рассматривались. Не учитывались также особенности военного времени (боевых действий) и террористических проявлений (диверсий).

При определении показателей степени риска для персонала и населения применяются следующие понятия:

- возможное число погибших — возможное число людей, доза облучения которых приводит к ранним детерминированным эффектам (ранним смертям);
- возможное число пострадавших — возможное число людей, доза облучения которых приводит к отсроченным стохастическим эффектам (отсроченным смертям);
- индивидуальный риск для персонала объекта — риск с учетом частоты реализации аварийного сценария;
- индивидуальный риск для населения на прилегающей территории — риск с учетом частоты реализации аварийного сценария;
- коллективный риск — ожидаемое число пострадавших (погибших) людей (персонала и населения) с учетом частоты реализации аварийного сценария.

Расчетные исследования оценок риска ранних и отсроченных случаев смертей на разных расстояниях от источника аварийного выброса (вместе с информацией о загрязнении поверхности земли и распределении плотности населения) позволяют оценить площадь земли, временно и полностью выведенной из землепользования; количество ранних ( $N_P$ ) и отсроченных из-за стохастических эффектов ( $N_{СТ}$ ) случаев смертей среди населения; коллективную дозу облучения населения ( $E_C$ ).

По определению риск летального исхода — это произведение частоты категории выбросов радиоактивных веществ на количество летальных исходов, определенное для данной категории выбросов радиоактивных веществ [7].

Таким образом, выявляются:

- риск ранних случаев смертей  $R_{P_i} = N_{P_i} f_i$  для каждого аварийного сценария с частотой  $f_i$ , чел./реактор-год;

Т а б л и ц а 1

**Пример показателей радиационного риска от возможных аварий  
на Курской атомной электростанции**

Показатель	Авария	
	Запроектная — наиболее опасный сценарий	Проектная — наиболее вероятный сценарий
Частота, 1/год	$4,0 \cdot 10^{-8}$	$10^{-4}$
Средняя индивидуальная эффективная доза, Зв		
Персонал	$10^{-2}$	$10^{-5}$
Население	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$
Индивидуальный риск смерти на 1 аварию (отдаленные эффекты), 1/год		
Персонал	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$
Население	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$
Индивидуальный риск смерти с учетом частоты иницирующих событий, 1/год		
Персонал	$2,0 \cdot 10^{-11}$	$5,0 \cdot 10^{-11}$
Население	$3,0 \cdot 10^{-12}$	$2,0 \cdot 10^{-12}$

Т а б л и ц а 2

**Пример показателей радиационного риска от возможных аварий  
на Ростовской атомной электростанции**

Показатель	Авария	
	Запроектная — наиболее опасный сценарий	Проектная — наиболее вероятный сценарий
Частота, 1/год	$3,8 \cdot 10^{-8}$	$5,6 \cdot 10^{-5}$
Средняя индивидуальная эффективная доза, Зв		
Персонал	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$
Население	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-7}$
Индивидуальный риск смерти на 1 аварию (отдаленные эффекты), 1/год		
Персонал	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$
Население	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-8}$
Индивидуальный риск смерти с учетом частоты иницирующих событий, 1/год		
Персонал	$4,75 \cdot 10^{-11}$	$2,0 \cdot 10^{-11}$
Население	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$1,8 \cdot 10^{-12}$

- риск отсроченных случаев смертей  $R_{\tilde{N}\dot{\sigma}_i} = N_{\tilde{N}\dot{\sigma}_i} f_i$  для каждого аварийного сценария с частотой  $f_i$ , чел./реактор-год;

- общий риск случаев смертей  $R_{\Sigma_i} = R_{P_i} + R_{\tilde{N}\dot{\sigma}_i}$  для каждого аварийного сценария с частотой  $f_i$ , чел./реактор-год;

- риск коллективной дозы  $R_{E_C} = E_C f_i$  для каждого аварийного сценария с частотой  $f_i$ , чел.·Зв/реактор-год;

- риск загрязнения земли, временно запрещенной к использованию, для каждого аварийного сценария с частотой  $f_i$ , га/реактор-год;

- риск загрязнения земли, выведенной из землепользования, для каждого аварийного сценария с частотой  $f_i$ , га/реактор-год.

В общем случае в перечень итоговых данных, полученных в результате проведения количественных оценок риска для атомной электростанции, рекомендуется включать следующие расчетные показатели: количество и риск ранних и отдаленных смертей среди персонала и населения, экономический ущерб в результате причинения вреда жизни и здоровью населения, затраты на эвакуацию и переселение населения. Пример оценки радиационного риска и социально-экономических последствий радиационных аварий приведен в табл. 1–4.

Т а б л и ц а 3

**Пример показателей социально-экономического риска от возможных аварий  
на Курской атомной электростанции**

Показатель	Авария	
	Запроектная — наиболее опасный сценарий	Проектная — наиболее вероятный сценарий
Частота, 1/год	$4,0 \cdot 10^{-8}$	$10^{-4}$
Численность, чел.		
Персонал	7 368	7 368
Население	1 365 132	1 365 132
Коллективная доза, чел.·Зв		
Персонал	740	$7,4 \cdot 10^{-2}$
Население	2090	0,48
Ущерб, млн руб.		
Персонал	22,2	$2,2 \cdot 10^{-2}$
Население	627	0,14

Т а б л и ц а 4

**Пример показателей социально-экономического риска от возможных аварий  
на Ростовской атомной электростанции**

Показатель	Авария	
	Запроектная — наиболее опасный сценарий	Проектная — наиболее вероятный сценарий
Частота, 1/год	$3,8 \cdot 10^{-8}$	$5,6 \cdot 10^{-5}$
Численность, чел.		
Персонал	1 620	1 620
Население	323 823	323 823
Коллективная доза, чел.·Зв		
Персонал	40	$1,1 \cdot 10^{-2}$
Население	234	0,21
Ущерб, млн руб.		
Персонал	12	$3,0 \cdot 10^{-3}$
Население	70	0,064

Обобщенная оценка риска отражает состояние промышленной безопасности при возможных авариях с указанием интегрального индивидуального риска гибели персонала атомной электростанции (группа А) и производственной площадки атомной электростанции (группа Б), а также состояние безопасности отдельных лиц из населения и коллективный риск гибели людей вследствие аварий.

Разработанная система методик оценки показателей риска может быть использована для управления рисками промышленных объектов Госкорпорации «Росатом», а также в других областях промышленности.

## Литература

1. PRA Procedures Guide: A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plants. — NUREG/CR-2300. — January, 1983.
2. *Papushkin V., Islamov R., Volkov A.* Development of Standard Probabilistic Risk Assessment (PRA) Procedure Guide. System modelling. — NSI-Predraft-Report-1999. — Russian Academy of Science, Nuclear Safety Institute. — January 1999.
3. *Исламов Р.Т., Дервянкин А.А., Жуков И.В., Берберова М.А., Глухов И.В., Исламов Д.Р.* Оценка риска для АЭС // Атомная энергия. — Декабрь-2010. — Т. 109, вып. 6. — С. 307.
4. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). — М.: Минздрав России, 2009.
5. *Исламов Р.Т.* Аналитические и статистические методы анализа надежности систем и безопасности объектов атомной энергетики: дис... доктора физ.-мат. наук. — М., 1995.
6. *Islamov R.* Uncertainty Analysis. Report for US Nuclear Regulatory Commission. — 1998.
7. Международные основные нормы безопасности для защиты от ионизирующих излучений и безопасного обращения с источниками излучения / Международное агентство по атомной энергии. — Серия изданий по безопасности, № 115. — Вена: МАГАТЭ, 1997.

*Поступила в редакцию 15.02.2011.*