

Оценка показателей риска для вторых очередей Смоленской и Курской АЭС

*М.А. Берберова*¹

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)

Актуальность работы

Атомные электростанции (АЭС) вследствие накопления в процессе эксплуатации значительных количеств радиоактивных продуктов и наличия принципиальной возможности выхода их при авариях за предусмотренные границы представляют собой источник потенциальной опасности или источник риска радиационного воздействия на персонал, население и окружающую среду. Степень радиационного риска прямо зависит от уровня безопасности АЭС. Безопасность АЭС является одним из основных свойств АЭС, определяющих возможность их использования в качестве источников тепловой и электрической энергии.

В 2004 году приказом Министра МЧС России № 506 «Об утверждении типового паспорта безопасности опасного объекта» был утвержден типовой паспорт безопасности опасного объекта. На его основании тогда же был разработан Типовой паспорт безопасности критически важного (опасного) объекта Росатома (далее – паспорт безопасности).

В соответствии с требованиями раздела II паспорта безопасности, необходимо проводить работы по оценке риска критически важных (опасных) объектов Росатома и оценке риска АЭС. В настоящее время существуют многочисленные оценки экологического риска, риска технологических аварий, иных рисков (политических, финансовых и т.п.) применительно к сложным техническим объектам, основанные на предположительно соблюдаемых нормах безопасности эксплуатации таких объектов с учетом вероятностей возникновения тех или иных сбоев. Однако именно радиационный риск для населения в зоне расположения АЭС при авариях различного типа не был определен, причем не было разработано методических рекомендаций по проведению соответствующего анализа. В то же время, в целях управления существующим парком реакторов как при вводе новых реакторов, так и при выводе выработавших свой ресурс в контексте оценки уровня безопасности окружающей среды такой анализ необходимо проводить.

В связи с этим задача проведения оценки радиационного риска для АЭС, учитывающей как вероятностный, так и детерминистический подходы, становится все более актуальной.

Цели и задачи работы

Целью работы является создание формул для расчета доз внешнего и внутреннего облучения населения для обоснования безопасности АЭС и практическое применение этих формул к реально действующим объектам.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Оценки риска вторых очередей Смоленской и Курской АЭС с реакторами типа РБМК-1000.
2. Разработка формулы для расчета годовой эффективной дозы облучения населения в кольцевом сегменте румба, с учетом розы ветров.
3. Расчет годовой эффективной дозы облучения населения в кольцевом сегменте румба для вторых очередей Смоленской и Курской АЭС с реакторами типа РБМК-1000.
4. Разработка формулы для расчета ущерба, нанесенного населению в кольцевом сегменте румба.
5. Расчет ущерба, нанесенного населению в кольцевом сегменте румба, для вторых очередей Смоленской и Курской АЭС с реакторами типа РБМК-1000.

Научная новизна работы

1. Разработана методика оценки показателей риска АЭС. На ее основе разработана процедура оценки социально-экономических последствий чрезвычайных ситуаций. Предложены процесс проведения экономических оценок риска и процедура оценки экономических последствий аварий на объекте.
2. Проведена оценка риска вторых очередей Курской и Смоленской АЭС. Выполнена

оценка эффективных доз облучения персонала и населения при наиболее опасных авариях на вторых очередях Курской и Смоленской АЭС. Проведен расчет показателей радиационного и экономического рисков от аварий на вторых очередях Курской и Смоленской АЭС.

3. Разработана формула для расчета годовой эффективной дозы облучения населения в кольцевом сегменте румба, с учетом розы ветров.
4. Разработана формула для расчета ущерба, нанесенного населению в кольцевом сегменте румба.

Теоретическая и практическая значимость работы

Предложенный подход к проведению оценок риска АЭС использован при оценках риска, связанного с эксплуатацией АЭС, в целях совершенствования применяемых на АЭС систем, выполняющих функции безопасности и функции снижения риска до приемлемого уровня.

Подход учитывает уровни:

- приемлемого риска;
- соответствующие санитарно-гигиенические критерии безопасности.

Предложена последовательность проведения оценок риска от идентификации опасностей и их количественной оценки до количественной оценки риска, а также порядок оформления отчета по результатам анализа и принятия решений по снижению риска до приемлемого уровня.

Результаты оценок риска могут быть использованы для:

- Определения возможности и оценки риска возникновения аварий на АЭС.
- Оценки возможных последствий чрезвычайных ситуаций.
- Оценки готовности АЭС к предупреждению аварий и достаточности мер по защите персонала и территорий от чрезвычайных ситуаций.
- Разработки мероприятий по снижению риска и смягчению последствий аварий.
- Расчёта сил и средств для ликвидации возможных аварий.

Безопасность АЭС является одним из основных свойств АЭС, определяющих возможность их использования в качестве источников тепловой и электрической энергии.

Согласно NUREG/CR-2300, вероятностным характеристикам безопасности АЭС соответствуют риски, связанные с авариями, например, на АЭС с непосредственными и отдаленными последствиями для населения и сверхнормативным загрязнением окружающей среды.

В данной работе рассмотрены, прежде всего, специфические для АЭС вопросы радиационной безопасности (рисунок 1).



Рисунок 1 – Оценка безопасности АЭС

Уровень безопасности АЭС, как и любых других опасных объектов, имеет стохастическую природу и обусловлен рядом случайных внутренних и внешних явлений природного и техногенного характера. В общем случае он определяется:

- Вероятностью возникновения внутренних исходных событий (то есть на самой АЭС), внешних техногенных катастроф, опасных природных явлений, а также потенциальным ущербом, который может быть причинен в результате возникновения этих событий.

- Размерами постоянного (при нормальной эксплуатации АЭС) вредного воздействия на человека и окружающую среду, определяющего возможность возникновения отдаленных стохастических последствий для населения и окружающей среды на фоне равновесного состояния экосистем.
- Вероятностью перерастания нормальной экологической обстановки в кризисную и возможностью последующего возникновения чрезвычайных ситуаций.
- Вероятностью успешного вмешательства с целью снижения размеров и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, а также степенью эффективности мероприятий, осуществляемых при таком вмешательстве.

Указанным выше вероятностным характеристикам уровня безопасности АЭС соответствуют три основные категории рисков:

- 1) Риски, связанные с авариями на АЭС и другими чрезвычайными ситуациями техногенного и природного характера с непосредственными детерминированными и отдаленными стохастическими последствиями для населения и сверхнормативным загрязнением окружающей среды.
- 2) Экстремальные экологические риски, связанные с возникновением чрезвычайных ситуаций экологического характера.
- 3) Экологические риски, связанные с ухудшением здоровья населения и негативными изменениями в окружающей среде, отдаленными стохастическими последствиями для жизни и здоровья людей вследствие вредного воздействия АЭС при нормальной эксплуатации.

В работе рассматриваются только первые две категории рисков – аварийные и экстремальные экологические.

Для количественной оценки интегрального (от всех возможных аварий) риска необходимо знать вероятности (частоты) возникновения опасных ситуаций F и уровень соответствующих опасных воздействий на людей D (например, возможный уровень доз радиации). Тогда интегральный индивидуальный риск определяется по формуле:

$$R = \sum_{i=1}^n k \cdot F_i \cdot D_i < R_a, \quad (1)$$

где: R_a – уровень приемлемого риска (risk acceptable), 1/год;

F – вероятность (частота) возникновения опасных ситуаций;

D – уровень соответствующих опасных воздействий на людей (например, максимальная доза облучения человека, Зв);

k – коэффициент, связывающий вероятность (частоту) гибели людей с опасными воздействиями ($5,6 \cdot 10^{-2}$ 1/Зв в соответствии с Публикацией 103 МКРЗ от 2007 года).

Частота повреждения АЭС (например, большого выброса радиоактивных веществ в окружающую среду) определяется путем сложения частот всех аварий, приводящих к соответствующим категориям последствий на АЭС:

$$F(R_j) = \sum_i f_i(R_j), \quad (2)$$

где: $F(R_j)$ – общая частота повреждения АЭС для категории последствий R_j ;

$f_i(R_j)$ – частота i -ой последовательности, приводящей к повреждению АЭС для категории последствий j .

В главе описаны ограничения и допущения для оценки показателей риска. Факторы риска, характерные для АЭС, могут быть сгруппированы следующим образом: радиационный риск; ядерный риск; пожаро и взрывоопасные риски; токсический риск; прочие факторы риска, такие, как поражение электрическим током, воздействие шума, вибраций, падение грузов, падение с высоты, воздействие избытка или недостатка кислорода, воздействие электромагнитных полей или лазеров и т.п.

Приведено описание необходимых исходных данных для оценки показателей риска. Описаны применяемые методы оценок риска и обосновано их применение. Приведено описание

определения показателей степени риска. Рассмотрена оценка социально-экономических последствий аварий.

В настоящей работе оценка риска проводится только для наиболее опасной аварии. Для Смоленской и Курской АЭС в качестве таковой рассматривалась авария «Потеря системы внешнего энергоснабжения с отказом на включение дизель-генератора» (частота последствий - $7 \cdot 10^{-8}$ 1/реактор-год).

При распространении радиоактивного облака максимальные дозы облучения формируются на расстоянии от 600 м до 1000 м от источника выброса (таблица 1).

Таблица 1 – Оценка эффективных доз облучения персонала при аварии «Потеря внешнего энергоснабжения с отказом на включение дизель-генератора» на Смоленской и Курской АЭС

Расстояние от источника выброса, км	Эффективная доза облучения, мЗв
0,2	10^{-3}
0,3	0.4
0,4	2.7
0,5	5.7
0,6	7.8
0,7	8.7
0,8	8.8
0,9	8.6
1,0	8.1

Для оценки радиационных последствий аварии выполнены расчеты годовых эффективных доз облучения населения (таблица 2).

Таблица 2 – Оценка средних суммарных эффективных годовых доз облучения населения при аварии «Потеря внешнего энергоснабжения с отказом на включение дизель-генератора» для Смоленской и Курской АЭС

Расстояние от АЭС, км	Годовая эффективная доза облучения, мЗв	
	Смоленская АЭС	Курская АЭС
3-5	9.1	4,4
5-10	3.8	1,8
10-15	1.4	0,7
15-20	0.8	0,4
20-30	0.5	0,2
30-40	0.3	0,1
40-50	0.2	0,1
50-100	0.1	0,04

Одним из результатов оценки риска, необходимых для представления в паспорте безопасности АЭС, является ситуационный план объекта, на котором нанесены изолинии зон поражающих факторов основных источников риска исследуемого объекта.

Пример ситуационного плана при наиболее опасной аварии для Смоленской АЭС представлен на рисунке 2: ось X - количество населения, проживающего на данном расстоянии от АЭС; ось Y - расстояние от АЭС, км; ось Z – годовая эффективная доза облучения, мЗв

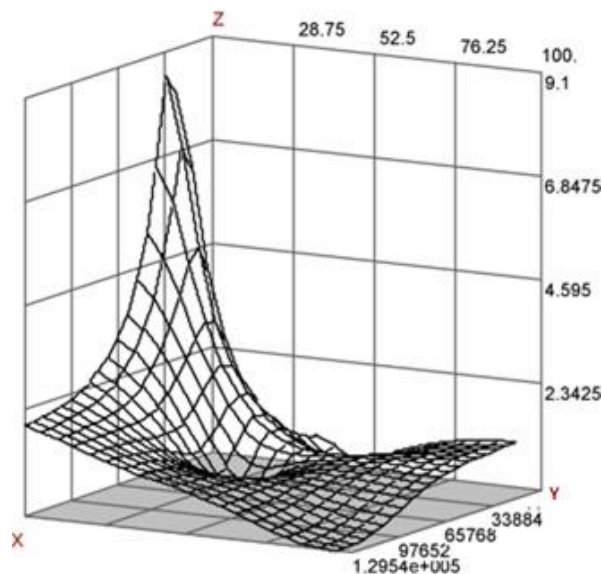


Рисунок 2 – Пример ситуационного плана – значения суммарной эффективной дозы внешнего и внутреннего облучения населения при наиболее опасной аварии для Смоленской АЭС

Анализ результатов расчетов доз облучения персонала в пределах санитарно-защитной зоны (1 км) Смоленской АЭС показывает, что:

- Ранние смертные случаи среди персонала исключаются, поскольку максимальные индивидуальные поглощенные дозы (~4 мГр) не достигают уровня 1 Гр, а внутреннего облучения щитовидной железы при ингаляции (~485 мГр) не достигают уровня 5 Гр, при котором возможны детерминированные эффекты. Возможное количество погибших в результате радиационного фактора поражения равно 0 человек.
- Возможное количество пострадавших (отдаленные последствия) – 1 человек.
- Коллективный риск (математическое ожидание потерь) – ожидаемое количество пострадавших среди персонала в результате аварии за 1 год составляет $7 \cdot 10^{-8}$ чел./год.

Анализ результатов расчетов доз облучения персонала в пределах санитарно-защитной зоны (1 км) Курской АЭС показывает, что ранние смертные случаи среди персонала исключаются, допускается 3 отсроченных смертных случая.

Анализ результатов расчетов доз облучения населения в пределах 100 км зоны вокруг Смоленской АЭС показывает, что:

- Ранние смертные случаи среди населения исключаются. Возможное количество погибших в результате радиационного фактора поражения равно 0 человек. Возможное количество пострадавших (отдаленные последствия) – 6 человек.
- Коллективный риск (математическое ожидание потерь) – ожидаемое количество пострадавших среди населения в результате аварии за 1 год составляет $1,4 \cdot 10^{-7}$ чел./год.

Анализ результатов расчетов доз облучения населения в пределах 100 км зоны вокруг Курской АЭС показывает, что:

- Ранние смертные случаи среди населения исключаются, допускается 17 отсроченных смертных случаев.
- Коллективный риск (математическое ожидание потерь) – ожидаемое количество пострадавших среди населения в результате аварии за 1 год составляет $1,3 \cdot 10^{-6}$ чел./год.

Суммарный коллективный риск (математическое ожидание потерь) составляет $2,1 \cdot 10^{-7}$ чел./год.

Экономический ущерб в результате причинения вреда здоровью персонала Смоленской и Курской АЭС составляет, соответственно, 6 и 18.8 млн. руб.

Экономический ущерб в результате причинения вреда здоровью населения Смоленской и Курской АЭС составляет, соответственно, 99 и 102 млн. руб.

В соответствии с Федеральным законом № 102-ФЗ от 26.06.2008 «Об обеспечении единства измерений», погрешность данных, представленных в работе, и результатов расчета оценок риска АЭС с реактором типа РБМК-1000 не превышает 0.15.

В работе предложена формула для расчета годовой эффективной дозы облучения населения в кольцевом сегменте румба, с учетом розы ветров. Проведен расчет годовой эффективной дозы облучения населения в кольцевом сегменте румба, с учетом розы ветров.

При равномерном распределении населения в кольцевом сегменте румба

$$D_E(R) = \frac{P_W}{R} \cdot \int_0^R N_{1/8}(r) \cdot D_{E(year)}(r) \cdot dr, \quad (3)$$

при дискретном распределении населения в кольцевом сегменте румба

$$D_E(R) = P_W \cdot \sum_{i=1}^k N_{1/8(i)} \cdot D_{E(year)(i)}, \quad (4)$$

- где: D_E – годовая эффективная доза облучения (effective dose) населения в кольцевом сегменте румба, с учетом розы ветров;
 R, r – расстояние от АЭС;
 P_W – вероятность направления ветра (probability of the wind direction);
 $N_{1/8}$ – количество людей в румбе;
 $D_{E(year)}$ – годовая эффективная доза облучения всего населения.

Расчет годовой эффективной дозы облучения населения в кольцевом сегменте румба, с учетом розы ветров, проводился для вторых очередей Смоленской и Курской АЭС с реактором типа РБМК-1000. Расчет проводился для наиболее опасной аварии «Потеря системы внешнего энергоснабжения с отказом на включение дизель-генераторов», частота исходного события – $7 \cdot 10^{-8}$ 1/реактор-год. Расчет проводился для дискретного распределения населения. При расчете учитывалось, что средняя скорость ветра равна 3 м/с. Расчет проводился для населения на расстоянии 3-30 км от АЭС. Получены следующие результаты: для Смоленской и Курской АЭС – годовая эффективная доза облучения одного человека по всем румбам не превышает 1.6 мЗв, что, согласно НРБ-99/2009, не превышает нормы.

В работе предложена формула для оценки ущерба, нанесенного населению в кольцевом сегменте румба. Проведена оценка ущерба, нанесенного населению в кольцевом сегменте румба.

При равномерном распределении населения в кольцевом сегменте румба

$$L(R) = \frac{L_{\Sigma}}{N_{\Sigma}} \cdot \frac{\int_0^R D_E(r) \cdot N_{1/8}(r) \cdot dr}{D_{E(year)}}, \quad (5)$$

при дискретном распределении населения в кольцевом сегменте румба

$$L(R) = \frac{L_{\Sigma}}{N_{\Sigma}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k D_{E(i)}(R) \cdot N_{1/8(i)}(R)}{D_{E(year)}}, \quad (6)$$

- где: L – ущерб, нанесенный населению в кольцевом сегменте румба;
 R, r – расстояние от АЭС;
 L_{Σ} – общий ущерб от аварии;
 N_{Σ} – общая численность населения;
 D_E – годовая эффективная доза облучения населения в кольцевом сегменте румба, с учетом розы ветров;
 $N_{1/8}$ – количество людей в румбе;
 $D_{E(year)}$ – годовая эффективная доза облучения всего населения.

Полученные результаты расчета ущерба одному человеку в кольцевом сегменте румба, в результате воздействия радиоактивных веществ для Смоленской и Курской АЭС, согласно РД ЭО 1.1.2.99.0624-2011, не превышают нормы.

Литература

1. *Берберова, М.А.* Оценка риска для АЭС / М.А. Берберова [и др.] // Атомная энергия, т. 109, вып. 6. – 2010. – С. 307-311.
2. *Берберова, М.А.* Оценка риска для АЭС с реакторами типа РБМК / М.А. Берберова [и др.] // Ядерная энергетика. Известия высших учебных заведений. – 2011. - № 3. - С. 56-62.
3. *Берберова, М.А.* Оценка риска для атомных электростанций с реакторами типа РБМК и ВВЭР / М.А. Берберова [и др.] // Труды МФТИ, т. 6, № 1. – 2014. – С. 146-153.
4. *Berberova, M.* Risk Assessment for Nuclear Power Plants / M. Berberova and [oth.] // International Conference on Opportunities and Challenges for Water Cooled Reactors in the 21st Century. - Vienna, Austria, 2009. – 1 электронный оптический диск (CD ROM).
5. *Берберова, М.А.* Разработка методики оценки показателей риска АЭС / М.А. Берберова [и др.] // XI Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров – 2009»: тезисы докладов. – Обнинск, 2009. – С. 10-11.
6. *Берберова, М.А.* Оценка риска для АЭС с реакторами различного типа / М.А. Берберова [и др.] // Ситуационные центры и информационно-аналитические системы класса 4i. SC-IAS4i-VRTerro2011: труды Международной научной конференции. – Протвино-Москва: Изд. ИФТИ, 2011. – С. 37-42.
7. *Берберова, М.А.* Анализ безопасности физической защиты потенциально опасных объектов / М.А. Берберова [и др.] // MEDIAS-2011: труды Международной научной конференции. – Протвино-Москва: Изд. ИФТИ. - С. 114-134.
8. *Берберова, М.А.* Оценка риска для АЭС / М.А. Берберова [и др.] // XII Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров – 2011»: тезисы докладов. – Обнинск, 2011. – С. 3-4.
9. *Берберова, М.А.* Оценка риска для АЭС с реактором типа БН / М.А. Берберова [и др.] // Научная конференция НИЯУ МИФИ-2012: аннотации докладов, том 1. – Обнинск, 2012. – С. 215.
10. *Берберова, М.А.* Оценка риска для АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000 (В-320) / М.А. Берберова [и др.] // Научная конференция НИЯУ МИФИ-2013: аннотации докладов, том 1. – Обнинск, 2013. – С. 231.
11. *Берберова, М.А.* Вопросы обеспечения безопасности АЭС: риск-монитор / Р.Т. Исламов, М.А. Берберова // XII Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров – 2013»: тезисы докладов. – Обнинск, 2013. – С. 28.
12. *Берберова, М.А.* Оценка риска для АЭС с реактором типа ВВЭР-440 (В-230) / М.А. Берберова [и др.] // XIII Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров – 2013»: тезисы докладов. – Обнинск, 2013. – С. 29-30.
13. *Берберова, М.А.* Оценка риска для АЭС с реакторами типа РБМК и ВВЭР / М.А. Берберова [и др.] // Ситуационные центры и ИАС4i для мониторинга и безопасности. SCVRT2013-14: труды Международной научной конференции. – Москва-Протвино: Изд. ИФТИ, 2013-2014. – С. 110-117.
14. *Берберова, М.А.* Анализ надежности персонала для проведения оценок риска / М.А. Берберова [и др.] // Ситуационные центры и ИАС4i для мониторинга и безопасности. SCVRT2013-14: труды Международной научной конференции. – Москва-Протвино: Изд. ИФТИ, 2013-2014. – С. 210-216.
15. *Берберова, М.А.* Оценка риска АЭС с реакторами типа РБМК / М.А. Берберова [и др.] // Научная конференция НИЯУ МИФИ-2015, аннотации докладов, том 1. - Обнинск, 2015. - С. 231.