

В.А. Острейковский, Д.И. Смолин

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТЕЙ ИСХОДНЫХ СОБЫТИЙ ПРИ АНАЛИЗЕ РИСКА ОТ ЭКСПЛУАТАЦИИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Рассмотрены проблемы повышения безопасности эксплуатации и увеличения ресурса отечественных водо-водяных ядерных реакторов. Проведен углубленный анализ риска от их эксплуатации. Дана количественная оценка вероятности исходных событий при анализе риска от эксплуатации указанных реакторов. Рассчитаны доверительные интервалы вероятности возникновения неблагоприятных событий.

Ядерный реактор, водо-водяной, оценка вероятности, риск, эксплуатация.

Введение

В решении проблемы повышения безопасности эксплуатации и увеличения ресурса отечественного энергетического оборудования, и в частности водо-водяных ядерных реакторов типа ВВЭР, необходим углубленный анализ одного из основных количественных показателей — риска от их эксплуатации.

Как известно [1–5], оценка риска — это ряд логических шагов, позволяющих обеспечить систематическим образом рассмотрение факторов опасности. Основой для практической оценки риска R как двумерной случайной величины является пара случайных величин [6]: вероятность возникновения i -го, $i = \overline{1, n}$, рискованного события $Q_i(t)$ и соответствующий ущерб от этого рискованного события $C_i(t)$, объединенных мультипликативно, при независимых между собой величинах Q и C :

$$R = \sum_{i=1}^n Q_i(t) \cdot C_i(t). \quad (1)$$

В атомной энергетике по степени тяжести последствий от чрезвычайных событий определены семь групп предельных состояний (ПС) ВВЭР [4, 5] (табл. 1).

Таблица 1

Группы предельных состояний для анализа безопасности ВВЭР

Группа	Вид предельного состояния	Степень опасности	Объекты угроз
ПС-7	Повреждение активной зоны. Разрушение корпуса реактора с выходом радиоактивности в окружающую среду	Предельно высокая	Население, АС, природная среда
ПС-6	Разрушение основных элементов компонентов первого и второго контуров с выходом радиоактивности в окружающую среду	Чрезмерно высокая	Население, АС, природная среда
ПС-5	Большие течи в первом контуре с выходом радиоактивности за пределы АС	Очень высокая	Население, АС, природная среда
ПС-4	Повреждения и течи в первом и втором контурах с возможным выходом радиоактивности за пределы АС	Высокая	Население, АС, природная среда
ПС-3	Повреждения и течи в первом и втором контурах с выходом радиоактивности внутри АС	Повышенная	Операторы, персонал, компоненты АС
ПС-2	Частичные повреждения без выхода радиоактивности за пределы первого контура, требующие ремонта	Невысокая	Повреждение оборудования
ПС-1	Частичные повреждения без выхода радиоактивности, не требующие ремонта	Низкая	Повреждение оборудования

1. Постановка задачи

Целью данной статьи является количественная оценка первого сомножителя выражения (1) — вероятности исходных событий $Q(t)$ при анализе риска

от эксплуатации ВВЭР на основании статистических данных, опубликованных в [4] для атомных станций всех поколений в мире.

Значения вероятностей $Q(t_k)$ и $Q(t_3)$ для всех реакторов, эксплуатировавшихся в мире, при $t \leq t_k$ и $t = t_3$, в [4] предлагается оценивать по соотношениям:

$$Q(t_k) = \frac{N_n}{N_{OK} \cdot t_k}; \quad Q(t_3) = \frac{N_n}{N_{O3} \cdot t_3}, \quad (2)$$

где N_n — число реакторов, получивших повреждения при заданном i -виде предельного состояния в соответствии с табл. 1; N_{OK} — общее число эксплуатировавшихся реакторов к моменту t_k возникновения заданного i -типа повреждения; N_{O3} — общее число реакторов к моменту t_3 ; t_k — среднее время (лет) эксплуатации одного реактора к моменту достижения заданного вида i -вида предельного состояния; t_3 — среднее время эксплуатации одного реактора.

Так как каждая тяжелая авария или катастрофа на АЭС в момент t_k сопровождалась комплексным анализом причин и источников, а также реализацией значительных по объемам и затратам мероприятий по повышению безопасности, то с течением времени при $t_3 > t_k$ после аварии или катастрофы наблюдалось снижение вероятностей от $Q(t_k)$ до $Q(t_3)$.

Необходимо отметить, что величины $Q(t_k)$ и $Q(t_3)$ в выражении (2) отличаются от классических показателей безотказной работы — безусловной вероятности отказа:

$$Q(t_k) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N_{OK} \rightarrow \infty}} \frac{\Delta N_k(\Delta t)}{N_{OK}}, \quad (3)$$

и фактически являются статистическим аналогом условной функции распределения времени до наступления рискового события:

$$Q(t_k) = \frac{\Delta N_k(\Delta t)}{N_{OK}}; \quad Q(t_3) = \frac{\Delta N_3(\Delta t)}{N_{O3}}. \quad (4)$$

2. Исходные данные для расчета вероятностей рисковых событий на АС мира

Необходимые для решения поставленной задачи статистические данные согласно сведениям, приведенным в [4], представлены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные для всех АС мира

Группа	N_n	N_{OK}	t_k , лет	N_{O3}	t_3 , лет
ПС-7	2	400	10,8	450	23,2
ПС-6	5	1890	7,8	2025	23,2
ПС-5	12	1890	4,5	2025	23,2
ПС-4	74	902	11,8	990	23,2

3. Расчетные значения вероятностей исходных событий на АС мира

В соответствии с классификацией предельных состояний табл. 1 рассмотрим значения вероятностей исходных событий аварий на АС. Расчет значений вероятностей исходных событий основан на статистических данных [4] с устранением обнаруженных опечаток.

Седьмая группа предельных состояний. В предположении, что в середине 80-х гг. XX в. (когда произошли две тяжелые аварии с повреждением активной зоны: ТМА (США, 1979 г.) и Чернобыльская АЭС (Украина, 1986 г.)) в мире

было около 400 реакторов со средним временем эксплуатации $t_k \approx 10,8$ года, по выражению (2) для тяжелой аварии седьмой группы значение $Q(t_k) \approx 4,9 \cdot 10^{-4}$ 1/г.

В 2000–2010 гг. при $N_{оэ} \approx 450$ и $t_3 \approx 23,2$ величина $Q(t_3) \approx 1,9 \cdot 10^{-4}$ 1/г. Число АС с ВВЭР в мире составляет около 92 % общего числа АС. Поэтому указанные выше вероятности для АС в мире снижаются до $Q(t_k) \approx 4,51 \cdot 10^{-4}$ 1/г и $Q(t_3) \approx 1,75 \cdot 10^{-4}$ 1/г.

11 марта 2011 г. в результате сильнейшего за время наблюдения землетрясения в Японии произошла радиационная авария на АЭС Фукусима-1, в которой были выведены из строя четыре энергоблока. Таким образом, значение N_n на сегодняшний день увеличилось до 6. Значение t_k с учетом среднего времени эксплуатации на момент аварии реакторов АЭС Фукусимы составляет 31 год. При $N_{оэ} \approx 450$ величина $Q(t_k) \approx 4,28 \cdot 10^{-4}$.

Шестая группа предельных состояний. К этой группе прежде всего относятся опасные повреждения и разрушения шестой группы несущих элементов первого контура (крышки и коллекторы парогенераторов), применительно к мировой атомной энергетике $N_n = 5$. Если $N_{ок} \approx 420$ и среднее число парогенераторов на одном блоке равно 4,5, то $N_{ок}^n = N_{ок} \cdot 4,5$ и $t_k = 7,8$ и значение $Q(t_k)$ составит $4,39 \cdot 10^{-4}$ 1/г. Принимая $t_3 = 23,2$ и $N_{ок} = 450$, получаем значение $Q(t_3) = 1,06 \cdot 10^{-4}$ 1/г. Таким образом, для ВВЭР в мировой атомной энергетике значения $Q(t_k)$ и $Q(t_3)$ составляют соответственно $4,03 \cdot 10^{-4}$ 1/г и $0,97 \cdot 10^{-4}$ 1/г.

Пятая группа предельных состояний. Это аварийные ситуации с разрушением или значительным повреждением основных элементов и компонентов первого контура, таких как коллекторы парогенераторов, корпуса задвижек и насосов, с выходом радиоактивности за пределы ядерных реакторов. Таких разрушений для всех АС в мире зафиксировано $N_n = 12$. Тогда при $N_{ок}^n = N_{ок} \cdot 4,5$ и $t_k = 4,5$ получаем $Q(t_k) = 1,3 \cdot 10^{-4}$ 1/г, а при $t_3 = 23,2$ и $N_{оэ}^n = N_{оэ} \cdot 4,5$ $Q(t_3) = 2,55 \cdot 10^{-4}$. Для ВВЭР в мировой энергетике таких ситуаций было существенно меньше, поэтому указанные вероятности снижаются соответственно до $Q(t_k) = 1,2 \cdot 10^{-3}$ 1/г и $Q(t_3) = 2,34 \cdot 10^{-4}$ 1/г.

Четвертая группа предельных состояний. Это группа предельных состояний ядерных энергетических установок (ЯЭУ) на АС мира с наибольшим числом повреждений и разрушений с возможным выходом радиоактивности за пределы АС. В основном это повреждения и частичные разрушения трубопроводов, коллекторов парогенераторов, роторов турбин, задвижек, насосов, барботажных баков. Число таких повреждений на всех АС мира составляет $N_n = 74$, тогда при $N_{ок}^n = 410$, $N_{ок} = N_{ок} \cdot 2,2$ и $t_k = 11,8$ $Q(t_k) = 6,95 \cdot 10^{-3}$ 1/г, при $t_3 = 23,2$ значение $Q(t_3) = 3,53 \cdot 10^{-3}$ 1/г.

Группы предельных состояний ПС3–ПС1. Современная система регистрации отказов и нарушений в работе АС не выделяет ту их часть, которая связана с критериями прочности, ресурса и живучести. Поэтому детальный анализ вероятностей неблагоприятных событий от третьей до первой группы ввиду отсутствия достоверных статистических данных затруднителен для АС мира. Результаты расчета значений вероятностей исходных событий $Q(t_k)$ и $Q(t_3)$ для групп ПС3–ПС1 по опубликованным в [4] данным для АС с ВВЭР России, выполненного Д.И. Смолиным, приведены далее. Итоговые значения вероят-

ностей исходных событий аварий и катастроф на всех АС мира и АС с ВВЭР представлены в табл. 3.

Таблица 3

Вероятности возникновения повреждений и разрушений на всех АС и на АС с ВВЭР в мире

Группа	АС		АС с ВВЭР	
	$Q(t_k), 1/г$	$Q(t_э), 1/г$	$Q(t_k), 1/г$	$Q(t_э), 1/г$
ПС-7	$4,90 \cdot 10^{-4}$	$1,90 \cdot 10^{-4}$	$4,51 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^{-4}$
ПС-6	$4,39 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$4,03 \cdot 10^{-4}$	$0,97 \cdot 10^{-4}$
ПС-5	$1,30 \cdot 10^{-3}$	$2,55 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$	$2,34 \cdot 10^{-4}$
ПС-4	$6,95 \cdot 10^{-3}$	$3,53 \cdot 10^{-3}$	$6,39 \cdot 10^{-3}$	$3,24 \cdot 10^{-3}$

4. Расчетные значения вероятностей исходных событий на АС СССР и России

Седьмая группа предельных состояний. Если учесть катастрофу на Чернобыльской АЭС со значениями $N_n = 1$, $N_{ок} = 28$, $t_k = 12,2$ года, значение $Q(t_k) = 2,93 \cdot 10^{-3}$ 1/г, а при $t_э = 29,8$ года, $N_{оэ} = 30$ значение $Q(t_э)$ составляет $1,12 \cdot 10^{-3}$ 1/г.

В Российской Федерации число энергоблоков с ВВЭР составляет около 50 % от общего числа АС. При этом известно, что в нашей стране до настоящего времени отсутствуют катастрофы с разрушением ЯЭУ с ВВЭР ($N_n = 0$). Поэтому при $N_{оэ} = 30$ и $t_э = 29,8$ величины $Q(t_k)$ и $Q(t_э)$ близки к нулю. Следовательно, для дальнейшей прогнозной оценки безотказности АС с ВВЭР можно принять $0 \leq Q(t_k) \leq 4,51 \cdot 10^{-4}$ 1/г и $0 \leq Q(t_э) \leq 1,75 \cdot 10^{-4}$ 1/г.

Вместе с тем к седьмой группе неблагоприятных событий можно отнести один случай повреждения опорных конструкций шахты ВВЭР первого поколения ($N_n = 1$). Тогда при $N_{оэ} = 30$ и $t_э = 29,8$ значение $Q(t_э) = 1,12 \cdot 10^{-3}$ 1/г.

С учетом последнего допущения приведенные выше значения вероятностей $Q(t_k)$ и $Q(t_э)$ для всех АС России следует удвоить.

Для групп предельных состояний ПС-5 и ПС-4 значения $Q(t_k)$ и $Q(t_э)$ определялись преимущественно повреждениями коллекторов парогенераторов ПГВ-1000 реакторов ВВЭР-1000. Если эти величины отнести к одному блоку с соответствующим числом поврежденных парогенераторов, то приведенные выше данные будут уточнены. Для пятой группы предельных состояний при $N_n = 3$, $N_{ок} = 10$, $t_k = 4,5$ значение $Q^*(t_k)$ будет $6,6 \cdot 10^{-2}$ 1/г, а при $t_э = 22,3$ значение $Q^*(t_э) = 1,34 \cdot 10^{-2}$ 1/г. Для четвертой группы предельных состояний при $N_n = 7$, $N_{ок} = 10$, $t_k = 6,9$ значение $Q^*(t_k) = 1,01 \cdot 10^{-1}$ 1/г, а при $t_э = 23,7$ значение $Q(t_э) = 2,9 \cdot 10^{-2}$ 1/г.

Группы предельных состояний ПС3–ПС1. Для предварительной оценки $Q(t_k)$ и $Q(t_э)$ воспользуемся следующими данными. Общее число нарушений в работе АС России за десятилетний период (1993–2003 г.), связанных с ремонтом и дефектами при изготовлении, составило около 170. Средняя доля отказов и нарушений на АС с ВВЭР составляет около 0,62 общего числа и приблизительно равняется 105. Если принять, что вероятности нарушений и отказов при переходе от третьей группы предельных состояний к первой снижаются на полпорядка, то указанные выше их числа распределятся следующим образом: третья группа — 19; вторая — 57; первая — 94; для ВВЭР третья группа — 12, вторая — 36, первая — 57.

По аналогии с изложенным в п. 2 настоящей статьи данные для расчета вероятностей исходных событий аварий для шести групп табл. 1 российских АС приведены в табл. 4.

Если принять, что за указанные десять лет происходило почти линейное сокращение числа отказов и нарушений, то с учетом приведенных выше средних значений $Q(t)$ можем рассчитать значения $Q(t_k)$, $Q(t_3)$. Эти значения представлены в табл. 5.

Таблица 4

Исходные данные для всех АС СССР и России

Группа	Наименование	N_n	N_{OK}	$N_{OK}^n = N_{OK} \cdot N_{n_{cp}}$	t_k , лет	N_{O3}	$N_{O3}^n = N_{O3} \cdot N_{n_{cp}}$	t_3 , лет
ПС-6	Все АС	3	25	127 = 25·5,1	7,2	30	144 = 25·5,1	29,2
	АС с ВВЭР	2	13	70,2 = 13·5,4	8,3	13	70,6 = 13·5,4	29,2
ПС-5	Все АС	5	30	126 = 30·4,2	4,2	30	126 = 30·4,2	27,4
	АС с ВВЭР	3	13	71 = 12·5,46	4,1	13	71 = 13·5,46	29,2
ПС-4	Все АС	46	28	112 = 28·4,0	6,2	30	120 = 30·4,0	29,2
	АС с ВВЭР	42	14	75,6 = 14·5,4	6,9	14	75,6 = 14·5,4	29,2
Среднее значение $Q(t)$, 1/г, при $N_{OK} \cong N_{O3}$								
ПС-3	Все АС	19	30				$6,3 \cdot 10^{-2}$	
	АС с ВВЭР	12	13				$8,1 \cdot 10^{-2}$	
ПС-2	Все АС	57	30				$1,9 \cdot 10^{-1}$	
	АС с ВВЭР	36	13				$2,4 \cdot 10^{-1}$	
ПС-1	Все АС	94	30				$3,1 \cdot 10^{-1}$	
	АС с ВВЭР	57	14				$3,8 \cdot 10^{-1}$	

Таблица 5

Вероятности возникновения повреждений и разрушений на всех АС и на АС с ВВЭР СССР и России

Группа	АС		АС с ВВЭР	
	$Q(t_k)$, 1/г	$Q(t_3)$, 1/г	$Q(t_k)$, 1/г	$Q(t_3)$, 1/г
ПС-6	$4,39 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$4,03 \cdot 10^{-4}$	$9,70 \cdot 10^{-4}$
ПС-5	$9,40 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$1,03 \cdot 10^{-2}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$
ПС-4	$6,61 \cdot 10^{-2}$	$1,28 \cdot 10^{-2}$	$8,05 \cdot 10^{-2}$	$1,91 \cdot 10^{-2}$
ПС-3	$8,60 \cdot 10^{-2}$	$2,95 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-1}$	$3,75 \cdot 10^{-2}$
ПС-2	$2,90 \cdot 10^{-1}$	$8,90 \cdot 10^{-2}$	$2,90 \cdot 10^{-1}$	$1,13 \cdot 10^{-1}$
ПС-1	$4,75 \cdot 10^{-1}$	$1,45 \cdot 10^{-1}$	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$1,79 \cdot 10^{-1}$

5. Расчет доверительных интервалов для вероятностей исходных событий

Расчет доверительных интервалов будем производить по выражению [7]

$$I_{\beta} = (\mu - t_{\beta} \sigma_{\mu}; \mu + t_{\beta} \sigma_{\mu}), \quad (5)$$

где μ — математическое ожидание; t_{β} — величина, определяющая для нормального закона число средних квадратических отклонений, которое нужно отложить вправо и влево от центра рассеивания для того, чтобы вероятность попадания в полученный участок была равна β .

Имея средние величины вероятностей наступления каждого из предельных состояний и принимая, что распределение вероятностей близко к нормальному, будем считать, что получили оценку математического ожидания μ^* .

Найдем среднеквадратическое отклонение σ , при условии что оно составляет 5 % от математического ожидания. Таким образом, получим результаты, приведенные в табл. 6 и 7.

В данной статье зададим доверительную вероятность $\beta = 0,95$ и значение $t_\beta = 1,96$. Значения $t_\beta \sigma_\mu$ для вероятностей наступления каждого из предельных состояний приведены в табл. 8 и 9.

Таблица 6

Среднеквадратическое отклонение относительно математического ожидания случайной величины $Q(t)$ для АС мира

Группа	АС		ВВЭР	
	$\sigma_{Q(t_k)}, 1/\Gamma$	$\sigma_{Q(t_3)}, 1/\Gamma$	$\sigma_{Q(t_k)}, 1/\Gamma$	$\sigma_{Q(t_3)}, 1/\Gamma$
ПС-7	$2,45 \cdot 10^{-5}$	$9,50 \cdot 10^{-6}$	$2,26 \cdot 10^{-5}$	$8,75 \cdot 10^{-6}$
ПС-6	$2,20 \cdot 10^{-5}$	$5,30 \cdot 10^{-6}$	$2,02 \cdot 10^{-5}$	$4,85 \cdot 10^{-6}$
ПС-5	$6,50 \cdot 10^{-5}$	$1,28 \cdot 10^{-5}$	$6,00 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-5}$
ПС-4	$3,48 \cdot 10^{-4}$	$6,40 \cdot 10^{-4}$	$3,20 \cdot 10^{-4}$	$1,62 \cdot 10^{-4}$

Таблица 7

Среднеквадратическое отклонение относительно математического ожидания случайной величины $Q(t)$ для АС СССР и России

Группа	АС		ВВЭР	
	$\sigma_{Q(t_k)}, 1/\Gamma$	$\sigma_{Q(t_3)}, 1/\Gamma$	$\sigma_{Q(t_k)}, 1/\Gamma$	$\sigma_{Q(t_3)}, 1/\Gamma$
ПС-6	$2,20 \cdot 10^{-5}$	$5,30 \cdot 10^{-6}$	$2,02 \cdot 10^{-5}$	$4,85 \cdot 10^{-6}$
ПС-5	$4,70 \cdot 10^{-4}$	$7,20 \cdot 10^{-5}$	$5,15 \cdot 10^{-4}$	$7,20 \cdot 10^{-5}$
ПС-4	$3,31 \cdot 10^{-3}$	$6,40 \cdot 10^{-4}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$	$9,55 \cdot 10^{-4}$
ПС-3	$4,30 \cdot 10^{-3}$	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$6,25 \cdot 10^{-3}$	$1,88 \cdot 10^{-3}$
ПС-2	$1,45 \cdot 10^{-2}$	$4,45 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^{-2}$	$5,65 \cdot 10^{-3}$
ПС-1	$2,38 \cdot 10^{-2}$	$7,25 \cdot 10^{-3}$	$2,90 \cdot 10^{-2}$	$8,95 \cdot 10^{-3}$

Таблица 8

Значения $t_\beta \sigma_\mu$ случайной величины $Q(t)$ для АС мира при доверительной вероятности $\beta = 0,95$

Группа	АС		ВВЭР	
	$t_{0,95} \cdot \sigma_{Q(t_k)}, 1/\Gamma$	$t_{0,95} \cdot \sigma_{Q(t_3)}, 1/\Gamma$	$t_{0,95} \cdot \sigma_{Q(t_k)}, 1/\Gamma$	$t_{0,95} \cdot \sigma_{Q(t_3)}, 1/\Gamma$
ПС-7	$4,80 \cdot 10^{-5}$	$1,86 \cdot 10^{-5}$	$4,42 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-5}$
ПС-6	$4,30 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$3,95 \cdot 10^{-5}$	$9,51 \cdot 10^{-6}$
ПС-5	$1,27 \cdot 10^{-4}$	$2,50 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$2,29 \cdot 10^{-5}$
ПС-4	$6,81 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$6,26 \cdot 10^{-4}$	$3,18 \cdot 10^{-4}$

Таблица 9

Значения $t_\beta \sigma_\mu$ случайной величины $Q(t)$ для АС СССР и России при доверительной вероятности $\beta = 0,95$

Группа	АС		ВВЭР	
	$t_{0,95} \cdot \sigma_{Q(t_k)}, 1/\Gamma$	$t_{0,95} \cdot \sigma_{Q(t_3)}, 1/\Gamma$	$t_{0,95} \cdot \sigma_{Q(t_k)}, 1/\Gamma$	$t_{0,95} \cdot \sigma_{Q(t_3)}, 1/\Gamma$
ПС-6	$4,30 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$3,95 \cdot 10^{-5}$	$9,51 \cdot 10^{-6}$
ПС-5	$9,21 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-4}$	$1,01 \cdot 10^{-3}$	$1,41 \cdot 10^{-4}$
ПС-4	$6,48 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$7,89 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{-3}$
ПС-3	$8,43 \cdot 10^{-3}$	$2,89 \cdot 10^{-3}$	$1,23 \cdot 10^{-2}$	$3,68 \cdot 10^{-3}$
ПС-2	$2,84 \cdot 10^{-2}$	$9,72 \cdot 10^{-3}$	$2,84 \cdot 10^{-2}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$
ПС-1	$4,66 \cdot 10^{-2}$	$1,42 \cdot 10^{-2}$	$5,68 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$

Теперь по формуле (5) можно рассчитать доверительные интервалы для вероятностей наступления каждого из предельных состояний (табл. 10–13).

Таблица 10

Доверительные интервалы случайной величины $Q(t_k)$ и $Q(t_3)$ для всех АС мира при доверительной вероятности $\beta = 0,95$

Группа	АС	
	$I_{0,95}$ для $Q(t_k)$, 1/г	$I_{0,95}$ для $Q(t_3)$, 1/г
ПС-7	$(4,42 \cdot 10^{-4}; 5,38 \cdot 10^{-4})$	$(1,71 \cdot 10^{-4}; 2,09 \cdot 10^{-4})$
ПС-6	$(3,96 \cdot 10^{-4}; 4,82 \cdot 10^{-4})$	$(9,56 \cdot 10^{-5}; 1,16 \cdot 10^{-4})$
ПС-5	$(1,17 \cdot 10^{-3}; 1,43 \cdot 10^{-3})$	$(2,30 \cdot 10^{-4}; 2,80 \cdot 10^{-4})$
ПС-4	$(6,27 \cdot 10^{-3}; 7,63 \cdot 10^{-3})$	$(1,15 \cdot 10^{-2}; 1,41 \cdot 10^{-2})$

Таблица 11

Доверительные интервалы случайной величины $Q(t_k)$ и $Q(t_3)$ для всех АС с ВВЭР при доверительной вероятности $\beta = 0,95$

Группа	ВВЭР	
	$I_{0,95}$ для $Q(t_k)$, 1/г	$I_{0,95}$ для $Q(t_3)$, 1/г
ПС-7	$(4,07 \cdot 10^{-4}; 4,95 \cdot 10^{-4})$	$(1,58 \cdot 10^{-4}; 1,92 \cdot 10^{-4})$
ПС-6	$(3,64 \cdot 10^{-4}; 4,42 \cdot 10^{-4})$	$(8,75 \cdot 10^{-5}; 1,07 \cdot 10^{-4})$
ПС-5	$(1,08 \cdot 10^{-3}; 1,32 \cdot 10^{-3})$	$(2,11 \cdot 10^{-4}; 2,57 \cdot 10^{-4})$
ПС-4	$(5,76 \cdot 10^{-3}; 7,02 \cdot 10^{-3})$	$(2,92 \cdot 10^{-3}; 3,56 \cdot 10^{-3})$

Таблица 12

Доверительные интервалы случайной величины $Q(t_k)$ и $Q(t_3)$ для всех АС СССР и России при доверительной вероятности $\beta = 0,95$

Группа	АС	
	$I_{0,95}$ для $Q(t_k)$, 1/г	$I_{0,95}$ для $Q(t_3)$, 1/г
ПС-6	$(3,96 \cdot 10^{-4}; 4,82 \cdot 10^{-4})$	$(9,56 \cdot 10^{-5}; 1,16 \cdot 10^{-4})$
ПС-5	$(8,48 \cdot 10^{-3}; 1,03 \cdot 10^{-2})$	$(1,30 \cdot 10^{-3}; 1,58 \cdot 10^{-3})$
ПС-4	$(5,96 \cdot 10^{-2}; 7,26 \cdot 10^{-2})$	$(1,15 \cdot 10^{-2}; 1,41 \cdot 10^{-2})$
ПС-3	$(7,76 \cdot 10^{-2}; 9,44 \cdot 10^{-2})$	$(2,66 \cdot 10^{-2}; 3,24 \cdot 10^{-2})$
ПС-2	$(2,62 \cdot 10^{-1}; 3,18 \cdot 10^{-1})$	$(8,03 \cdot 10^{-2}; 9,77 \cdot 10^{-2})$
ПС-1	$(4,28 \cdot 10^{-1}; 5,22 \cdot 10^{-1})$	$(1,31 \cdot 10^{-1}; 1,59 \cdot 10^{-1})$

Таблица 13

Доверительные интервалы случайной величины $Q(t_k)$ и $Q(t_3)$ для всех АС СССР и России с ВВЭР при доверительной вероятности $\beta = 0,95$

Группа	ВВЭР	
	$I_{0,95}$ для $Q(t_k)$, 1/г	$I_{0,95}$ для $Q(t_3)$, 1/г
ПС-6	$(3,64 \cdot 10^{-4}; 4,42 \cdot 10^{-4})$	$(8,75 \cdot 10^{-5}; 1,07 \cdot 10^{-4})$
ПС-5	$(9,29 \cdot 10^{-3}; 1,13 \cdot 10^{-2})$	$(1,30 \cdot 10^{-3}; 1,58 \cdot 10^{-3})$
ПС-4	$(7,26 \cdot 10^{-2}; 8,84 \cdot 10^{-2})$	$(1,72 \cdot 10^{-2}; 2,10 \cdot 10^{-2})$
ПС-3	$(1,13 \cdot 10^{-1}; 1,37 \cdot 10^{-1})$	$(3,38 \cdot 10^{-2}; 4,12 \cdot 10^{-2})$
ПС-2	$(2,62 \cdot 10^{-1}; 3,18 \cdot 10^{-1})$	$(1,02 \cdot 10^{-1}; 1,24 \cdot 10^{-1})$
ПС-1	$(5,23 \cdot 10^{-1}; 6,37 \cdot 10^{-1})$	$(1,61 \cdot 10^{-1}; 1,97 \cdot 10^{-1})$

Заключение

Для групп предельных состояний ПС-5 и ПС-4 значения $Q(t_k)$ и $Q(t_3)$ определялись преимущественно повреждениями коллекторов парогенераторов ПГВ-1000 реакторов ВВЭР-1000. Если эти величины отнести к одному блоку с соответствующим числом поврежденных парогенераторов, то приведенные выше данные будут уточнены. Для пятой группы предельных состояний при $N_n = 3$, $N_{ок} = 10$, $t_k = 4,5$ значение $Q^*(t_k)$ будет $6,6 \cdot 10^{-2}$ 1/г, а при $t_3 = 22,3$ значе-

ние $Q^*(t_3) = 1,34 \cdot 10^{-2}$ 1/г. Для четвертой группы предельных состояний при $N_n = 7$, $N_{ок} = 10$, $t_k = 6,9$ значение $Q^*(t_k) = 1,01 \cdot 10^{-1}$ 1/г, а при $t_3 = 23,7$ значение $Q^*(t_3) = 2,9 \cdot 10^{-2}$ 1/г.

Сопоставление приведенных выше вероятностей $Q(t_k)$ и $Q(t_3)$ зарубежных и отечественных АС показывает, что различие между ними составляет от полпорядка до порядка, что соответствует различию в коэффициентах использования установленной мощности от 0,90–0,92 для зарубежных АС до 0,73–0,76 для отечественных.

Следует отметить, что диапазоны пренебрежимых вероятностей $[Q(t)]_{\min}$ с повреждениями активной зоны реакторов в отечественной и зарубежной литературе и в ряде нормативно-технических документов указываются на уровне 10^{-7} 1/г, а приемлемых $[Q(t)]$ — на уровне 10^{-7} 1/г. Сопоставление этих значений для предельного состояния ПС-7 показывает, что на момент возникновения тяжелых аварий и катастроф величины $Q(t_k)$ превосходили $[Q(t)]_{\min}$ примерно в $2,30 \cdot 10^4$ раза, а $[Q(t)]$ — в $1,12 \cdot 10^4$.

Проведенные в последние 30 лет после катастроф на АЭС ТМА (США) и ЧАЭС (СССР) мероприятия по повышению безопасности АС позволили снизить вероятность возникновения неблагоприятных событий примерно в 2,2 раза. Однако это указывает на то, что АС (в том числе АС с ВВЭР) остаются в зоне чрезвычайно высокой потенциальной опасности, и требуются еще значительные исследования и соответствующие мероприятия по повышению безопасности АС.

В статье были рассчитаны доверительные интервалы для случайных величин $Q(t_k)$ и $Q(t_3)$ — вероятностей неблагоприятных событий для всех АС мира, АС мира с ВВЭР, всех отечественных АС и отечественных АС с ВВЭР.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Острейковский В.А.* Техногенный риск: Введение в теорию: Учеб. пособие. Сургут: ИЦ СурГУ, 2009. 63 с.
2. *Острейковский В.А., Швыряев Ю.В.* Безопасность атомных станций: Вероятностный анализ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 353 с.
3. *Острейковский В.А., Саакян С.П.* Модели определения вероятностей исходных событий аварий методами теории катастроф // Тр. МБ АР. 2010. С.123–126.
4. *Анализ риска и повышение безопасности водо-водяных энергетических реакторов* / Н.А. Махмутов, К.В. Фролов, Ю.Г. Драгунов и др.; Под ред. Н.А. Махмутова и М.М. Гаденина; Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. М.: Наука, 2009. 499 с.
5. *Острейковский В.А., Саакян С.П.* Техногенная безопасность и риск от эксплуатации атомных станций: Учеб. пособие. Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2011. 160 с.
6. *Острейковский В.А.* Математические модели теории техногенного риска. Сургут: ИЦ СурГУ, 2012. 253 с.
7. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1998. 576 с.

V.A. Ostrejkovsky, D.I. Smolin

The quantification for probabilities of the initial events under consideration of operational risk at nuclear power stations

The article considers problems of increasing the operational safety and resource of domestic water-water nuclear reactors. They conducted deep analysis of their operational risk, giving quantification of probability of the initial events considering the operational risk of the said reactors. Subject to computation being confidence intervals for probability of the adverse events.

Nuclear reactor, water-water, probability assessment, risk, operation.