



УДК 621.039.58

© 2007

В. И. Пампура

Управление безопасностью объектов атомной энергетики согласно концепции виртуальной аварии

(Представлено академиком НАН Украины В. П. Кухарем)

The article substantiates the control over the safety of nuclear engineering objects (including NPPs, surface and underground repositories) according to the conception of virtual accident. The comprehensive analysis of the mistake of the probabilistic model of the time interval between heavy accidents is given. The step-by-step control over the safety with the use of some states of an object is grounded.

Проблема экологической безопасности особо остро стоит для объектов атомной энергетики, включая безопасность АЭС, поверхностных хранилищ отходов ядерного топлива и радиоактивных отходов (РАО), а также их изоляции в недрах Земли. Негативное воздействие на окружающую среду в результате потребления энергии резко возрастает. При отсутствии защиты затраты на устранение негативных последствий превосходят стоимость выработанной электроэнергии [1]. Обеспечение безопасности АЭС опирается на достаточно большой опыт их эксплуатации, а также классическую теорию анализа риска аварии [2–5]. Проблема обеспечения безопасности поверхностных хранилищ РАО, а также изоляции отходов ядерного топлива и других долгоживущих радиоактивных отходов в недрах Земли качественно отличается от проблемы обеспечения безопасности. Отличия состоят в отсутствии, во-первых, опыта эксплуатации хранилищ и изоляционных сооружений, а также в очень большом требуемом сроке существования хранилищ изоляционных сооружений [6, 7].

Несмотря на качественные отличия, решение проблемы обеспечения безопасности как АЭС, так и хранилищ и изоляционных сооружений имеют общие методологические причины возможной аварии. Такими причинами являются неполнота и неопределенность исходной информации об авариях, а также погрешность технологии обращения с РАО [8, 9].

В связи с вышеизложенным необходимо уяснить пригодность существующей методологии анализа безопасности согласно вероятностной модели возможной аварии, используемой в работах по анализу риска [2–5].

Принципиальным положением существующей теории управления безопасностью является выбор математической модели времени наступления аварии АЭС. В логико-матема-

тическом подходе, реализуемом в методе дерева событий [2–5], используется представление о неограниченной случайной непрерывной величине времени наступления тяжелой аварии.

Обозначим неограниченную случайную непрерывную величину времени наступления тяжелой аварии через η , плотность вероятности которой $\psi(y)$. Соответственно, значения у случайной величины η принадлежат полубесконечному интервалу: $y \in [0; \infty]$. Согласно теории вероятностей, вероятность

$$P\{\eta \in [0; \infty]\} = \int_0^{\infty} \psi(y) dy = 1. \quad (1)$$

Соответственно, вероятность тяжелой аварии на интервале срока службы $[0, \tau]$ равна

$$P\{\eta \in [0, \tau]\} = \int_0^{\tau} \psi(y) dy = 1 - \int_{\tau}^{\infty} \psi(y) dy. \quad (2)$$

При обычно нормируемом допустимом значении вероятности риска тяжелой аварии 10^{-7} реактор/год [10] и сроке службы $\tau = 30$ лет вероятность аварии за период срока службы

$$P\{\eta \in [0, \tau]\} = \int_0^{\tau} \psi(y) dy \cong 3 \cdot 10^{-6} \text{ реактор/срок службы} \quad (3)$$

мала. Это, по мнению нормировщиков, делает практически невозможной тяжелую аварию с выбросом радиоактивных веществ [10]. Однако при этом не учитывается погрешность аппроксимации ограниченного срока службы объекта неограниченной случайной величиной, что приводит к следующей некорректности математической модели [11].

Действительно, для неограниченной случайной величины времени тяжелой аварии η значение вероятности аварии на интервале после снятия АЭС с эксплуатации $[\tau; \infty]$ равно

$$P\{\eta \in [\tau; \infty]\} = \int_{\tau}^{\infty} \psi(y) dy = 0,999997. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что наибольшая (почти стопроцентная) вероятность аварии АЭС, например плавление активной зоны, наступит после снятия ее с эксплуатации. Понятно, что такой вывод противоречит основным представлениям о свойствах АЭС. Очевидно, что после снятия с эксплуатации (при отсутствии ядерного топлива в реакторе) плавление активной зоны невозможно.

Практическая несостоятельность модели неограниченной случайной непрерывной величины времени наступления тяжелой аварии (например, плавления активной зоны) η видна из следующего анализа. Пусть вероятность времени плавления активной зоны подчинена экспоненциальному закону

$$P\{\eta > t\} = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (5)$$

который наиболее подходит для априорного анализа. Для малых значений вероятности аварии справедливо равенство

$$P\{\eta > t\} = \lambda t. \quad (6)$$

Интенсивность наступления события плавления активной зоны

$$\lambda = \frac{1}{T^0}, \quad (7)$$

где T^0 — среднее значение времени плавления активной зоны. Соответственно, для $t = 1$ год вероятность

$$P\{\eta > 1\} = \lambda \cdot 1/\text{год} = 10^{-7}. \quad (8)$$

Тогда среднее значение времени плавления активной зоны

$$T^0 = 10^7 \text{ лет}. \quad (9)$$

Согласно технологии работы АЭС, плавление активной зоны возможно только при наличии в реакторе ядерного топлива. Понятно, что плавление активной зоны может быть только в период эксплуатации АЭС. В связи с этим статистическое среднее значение времени плавления $T_{\text{ст}}^0$ не может быть больше срока эксплуатации АЭС τ даже в случае, если бы плавление активной зоны произошло в последний год эксплуатации АЭС. Срок эксплуатации АЭС τ измеряется десятками лет и существенно меньше значения 10^2 лет. Поэтому всегда имеет место неравенство $T_{\text{ст}}^0 \leq \tau \ll T^0$. Следовательно, значение $T^0 = 10^7$ лет не имеет практического смысла. Соответственно, нормированное значение показателя риска плавления активной зоны $P\{\eta > t\} \leq 10^{-7}$ реактор/год не может быть апробировано. Оно является следствием некорректного применения математических методов.

Поэтому модель неограниченной случайной величины времени тяжелой аварии не может быть принята для корректной оценки вероятности риска аварии.

Рассмотрим корректность модели ограниченной случайной величины времени тяжелой аварии ξ с плотностью вероятности $\phi(x)$, когда значения x случайной величины ξ принадлежат конечному интервалу: $x \in [0; \tau]$. В соответствии с теорией, вероятность наступления тяжелой аварии за время срока службы

$$P\{\xi \in [0; \tau]\} = \int_0^{\tau} \psi(y) dy = 1. \quad (10)$$

Следовательно, согласно модели ограниченной случайной величины ξ , неизбежна тяжелая авария АЭС за время ее службы.

Из приведенного примера следует отрицание статистической устойчивости модели случайного события аварии, а также необходимость модели виртуальной аварии, которая будет рассмотрена далее.

Приведенный анализ моделей неограниченной и ограниченной непрерывных случайных величин времени наступления аварии справедлив для любых объектов атомной энергии.

Из вышеизложенного следует, что *постулирование модели как неограниченной η , так и ограниченной ξ случайных величин времени наступления тяжелой аварии не пригодно для управления безопасностью объектов атомной энергетики с целью предотвращения аварии, так как при таком постулате аварии становятся статистически закономерными (неизбежными). Тогда теоретически теряют смысл любые концепции обеспечения безопасности объектов атомной энергии. Поэтому необходимы другие подходы к обоснованию модели тяжелой аварии.*

Основным принципом экспертного анализа опасности является разработка сценариев в виде симптомно-ориентированных инструкций возможной тяжелой аварии потенциально опасного объекта из-за отказа (исходного события) того или иного элемента системы управления безопасностью. Сценарий заключается в комбинации событий работоспособности и неработоспособности (отказов) элементов системы защиты объекта совместно с исходным событием, которые, по мнению эксперта, могут приводить к аварии. При этом априори постулируется стохастическая закономерность аварий. Примером такого подхода является анализ “маловероятных событий”, которые практически не наблюдались [2–5]. Анализируется последовательность “более вероятных событий”, связанных с маловероятным событием постулируемой причинно-следственной цепочки [3]. На основе этой идеи в методе дерева событий рассматривается сочетание исходного события с различными комбинациями событий работоспособности и неработоспособности выбранных экспертом элементов систем защиты от аварий. Эти события полагаются независимыми, вероятность комбинации равна произведению вероятностей событий, образующих комбинацию. Вероятность аварии равна вероятности исходного события, умноженной на сумму вероятностей тех комбинаций, которые, по мнению эксперта, являются “более вероятными событиями” и могут совместно с исходным событием привести к аварии. Например, так рассматривается вероятность выброса вредных веществ из-за плавления активной зоны реактора [2, 3, 5].

Методологическая погрешность такого анализа заключается в принятии вероятностной гипотезы аварий, с одной стороны, и постулировании независимости событий, образующих комбинации, с другой. Действительно, если событие аварии не наблюдалось и поэтому статистически неустойчиво, то теоретически частота его появления равна нулю. Соответственно, и его вероятность (как теоретическое отображение частоты) также равна нулю. Тогда “более вероятные события” являются несовместными и, следовательно, зависимыми. Поэтому, нельзя принять гипотезу их независимости. Известно, что событие плавления активной зоны не является устойчивым (известны только две такие крупные аварии, не связанные общими статистическими закономерностями).

Таким образом, если нет оснований для априорной гипотезы постоянства частоты аварии (статистической устойчивости ее закономерностей), то нет и основания для ее вероятностной гипотезы. *Такая авария априори гипотетически возможна, но она не является статистически закономерной!*

Гипотетическая возможность принципиально отличается от статистической закономерности (неизбежности). Такую возможность нельзя отрицать в принципе, но она не является закономерной, как вероятностная модель аварии. Соответственно, исходя из гипотетической (а не вероятностной) возможности аварии, следует использовать подход к управлению безопасностью, принципиально отличающийся от вероятностного подхода к трактовке аварии.

Методологически важный случай, требующий учета маловероятных событий типа землетрясения или падения самолета. Например, периодичность землетрясения принимается равной 10^6 лет. Если срок службы объекта $\tau \ll 10^6$ лет (для АЭС срок службы $\tau < 100$ лет), то с позиций управления безопасностью нельзя утверждать постоянство частоты землетрясения на интервале τ . Иначе, такого рода события с позиций управления безопасностью объектов атомной энергии следует рассматривать как статистически неустойчивые по отношению к событию аварии потенциально опасного объекта. Таким образом, следствием методологической погрешности постулирования вероятностной природы потенциально возможных тяжелых аварий (типа плавления активной зоны) является перевод гипотети-

чески возможных (но практически не обязательных!) аварий в разряд статистически закономерных и, следовательно, теоретически неизбежных. Тогда концепция глубоко эшелонированной защиты становится теоретически бесполезной, так как согласно вероятностной гипотезе авария неизбежна при любых защитах.

Указанные методологические ограничения вероятностной модели случайных величин времени наступления тяжелой аварии сняты в концепции виртуальной аварии [8, 9, 12].

Виртуальная авария — такая авария, для которой невозможно установить закономерности из-за неполноты знаний об аварии и погрешности управления безопасностью, которая гипотетически возможна (теоретически не может быть исключена), но практически не обязательна. В основе определения виртуальной аварии лежит понятие возможности аварии. *Возможность — априори предполагаемое событие (последовательность событий, как предполагаемых причин аварии), которое не имеет априори устойчивых статистических данных появления этого события* [8, 9].

Очевидно, что управление безопасностью (как любое априорное управление) можно осуществить, только используя закономерности. Следуя методологии виртуальной аварии (когда отсутствует стохастическая закономерность аварии), наиболее управляемой закономерностью обеспечения безопасности, которую целесообразно использовать для управления безопасностью, является закономерность технологии предупреждения аварии. Эта технология достаточно хорошо разработана и постоянно совершенствуется за счет наукоемких технологий. Поэтому оптимальное управление безопасностью объектов атомной энергетики для модели виртуальной аварии целесообразно осуществлять путем оптимизации прежде всего технологии предотвращения аварии [8, 9].

Однако так как авария не может быть теоретически исключена, то необходимо предусматривать и возможность управления в случае ее наступления. Иначе, ввиду априорной неопределенности появления аварии, необходимо использовать принцип управления по текущему состоянию объекта. Согласно этому принципу на каждом шаге управления следует иметь возможность перехода в безопасное состояние объекта, когда его текущее состояние потенциально опасно.

Принцип управления безопасностью по состоянию объекта необходимо использовать в течение всего срока службы поверхностного хранилища. Объясняется это проблемой обеспечения долговечности поверхностного хранилища [6]. Согласно этому принципу необходимо предусмотреть возможность повторного извлечения контейнеров с РАО и их перезахоронения, когда прогнозируется опасность для текущего состояния объекта.

Принцип управления безопасностью по состоянию объекта целесообразно использовать и для геологического хранилища РАО. Согласно существующей теории захоронения РАО в недрах Земли, геологическое хранилище представляет собой экологическую опасность на этапах его создания, вплоть до закрытия геологического хранилища [6]. Этот вывод подтверждается результатами фундаментальных исследований по проблеме изоляции РАО в недрах Украины [7]: “даже после засыпки и гермитизации хранилища, остается возможность повторного извлечения упаковки отходов в течение длительного периода времени, на протяжении которого упаковка сохраняет свою целостность” [7, с. 21–22]. При этом “дозовые нагрузки . . . , а также риски потенциального облучения . . . должны быть настолько низкими, насколько возможно с учетом экономической целесообразности. . . ” [7, с. 82].

Реализация цитируемых положений и управление безопасностью при постулировании виртуальной аварии полностью соответствует положениям концепции “максимальной безопасности при минимуме затрат” [8, 9].

Таким образом, принцип управления по состоянию является общим принципом управления безопасностью любых объектов атомной энергетики, составляющим часть концепции “максимальной безопасности при минимуме затрат”.

1. *OECD/NEA* (Nuclear Energy Agency). Methodologies for Assessing the Economic Consequences of Nuclear Reactor Accidents. – Paris, 2000.
2. *Хенли Э. Д., Кумато Х.* Надежность технических систем и оценка риска. – Москва: Машиностроение, 1979. – 528 с.
3. *Уивер Л.* Риск от аварии на АЭС с легководяными реакторами // Безопасность ядерной энергетики. – Москва: Атомиздат, 1980. – С. 114–133.
4. *Швыряев Ю. В. и др.* Вероятностный анализ безопасности атомных станций. Методика выполнения. – Москва: ИАЭ им. Курчатова, 1992. – 266 с.
5. *Бегун В. В., Горбунов О. В., Каденко И. Н. и др.* Вероятностный анализ безопасности атомных станций 9ВВАБ0. Учеб. пособие. – Киев, 2000. – 568 с.
6. *Пампура В. И.* Принцип необходимой оптимальной управляемости безопасностью обращения с радиоактивными отходами // Доп. НАН України. – 2003. – № 6. – С. 182–187.
7. *Шестопалов В. М. и др.* Изоляция радиоактивных отходов в недрах Украины / Под ред. В. М. Шестопалова. – Киев: Научно-инженерный центр радиогидрогеологических полигонных исследований, 2006. – 398 с.
8. *Пампура В. И.* Максимальная безопасность атомных станций при минимально возможных затратах // Доп. НАН України. – 2006. – № 5. – С. 186–192.
9. *Пампура В. И.* Концепция максимальной безопасности АЭС при минимуме возможных затрат // Докл. на конф., посвященной 20-летию чернобыльской катастрофы, Киев, 24–26 апр. 2006 г. – Киев, 2006. – С. ТЗ–22.
10. *Общие положения обеспечения безопасности атомных станций.* – НП 30.1. 02\1.034–2000.
11. *Пампура В. И., Инюшев В. В., Шараевский И. Г.* Методология системного подхода к оптимальному управлению безопасностью АЭС // Ядерная и радиационная безопасность. – 2003. – № 4. – С. 26–42.
12. *Пампура В. И.* Концепция тяжелой аварии и верхняя оценка ее риска // Доп. НАН України. – 2001. – № 7. – С. 185–190.

Институт электродинамики НАН Украины, Киев

Поступило в редакцию 26.03.2007