



УДК 629.162.658

© 2012

В. И. Пампура

Система показателей экологически опасных объектов

(Представлено академиком НАН Украины В. М. Шестопаловым)

Рассматриваются обобщенные конструктивные показатели экологической безопасности объектов. Обоснована система конструктивных показателей опасности объектов постоянной экологической опасности и потенциально опасных из-за истощения ресурса.

Методология анализа влияния экологически опасных объектов (ЭОО) на окружающую среду включает в себя ряд аспектов. Во-первых, это связано с анализом аварий ЭОО как из-за ограниченной безопасности их экологически опасных компонент (ЭОК), так из-за ограниченной надежности их подсистем предупреждения и защиты. Во-вторых, необходим анализ воздействия внешней среды на ЭОО, поскольку возможны аварийные последствия ЭОК. В-третьих, аварии могут быть как вследствие выброса вредных радиоактивных отходов (РАО, химически опасных веществ), так и вследствие ограниченного ресурса потенциально опасных объектов. К первым относятся атомные электростанции (АЭС), хранилища РАО, заводы по переработке РАО и т. п., а также производство, хранение и обращение с химически опасными продуктами и отходами. К потенциально опасным относятся объекты, в результате истощения ресурса которых может наступить экологическая катастрофа. К таким объектам относятся гидросооружения типа ДнепрогЭС, Киевского вдхр. и т. п., истощение их ресурса может привести к большим разрушениям в селах и городах из-за водной стихии.

Анализу аварий ЭОО из-за ограниченной безопасности ЭО и их подсистем предупреждения и защиты посвящен ряд работ [1–5]. В них используется вероятностная гипотеза аварии без учета ущерба от аварии. Ограничение этой гипотезы и учет ущерба дано в теории оптимального управления безопасностью ЭОО [6–12]. Согласно данной теории, управление безопасностью ЭОО предполагает сочетание технической эффективности (максимальной безопасности) с практической возможностью ее реализации на основе экономической эффективности (минимизации суммарных затрат на безопасность и их оптимального распределения) [7, 10].

Обеспечение безопасности экономически связано с проблемой минимизации суммарных затрат на безопасность и с оптимальным их перераспределением между затратами на технологию управления безопасностью с целью предотвращения и ослабления аварии C_1 и за-

тратами на устранение ее последствий (или затратами на страхование для уникальных, виртуальных аварий) C_2 . Затраты на технологию управления C_1 и на страхование последствий аварий C_2 зависят от значения показателя риска аварии R , т. е. они являются функциями: $C_1 = \varphi_1(R)$, $C_2 = \varphi_2(R)$ [7, 10, 11]. Суммарные затраты на безопасность

$$C = C_1 + C_2, \quad (1)$$

где $C_1 = \varphi_1(R)$ — функция затрат на предупреждение и ослабление аварии от R ; $C_2 = \varphi_2(R)$ — функция вероятных затрат на страхование последствий от R :

$$C_2 = RC_{2\max}. \quad (2)$$

Здесь $C_{2\max}$ — максимальные прогнозируемые затраты на устранение последствий.

В свою очередь, с целью оптимизации показатель риска тяжелой аварии R можно рассматривать как функцию стоимостей C_1 и C_2 :

$$R = f(C_1, C_2). \quad (3)$$

Оптимальное значение показателя риска $R_{\text{опт}}$ определяется из условия минимума суммарных затрат на безопасность: $C_{\min} = \min(C_1 + C_2) = C_{1\text{опт}} + C_{2\text{опт}}$.

Этот минимум достигается, согласно следующему условию [10, 11]:

$$C_{1\text{опт}} = \varphi(R_{\text{опт}}) = C_{2\text{опт}} = \frac{C_{\min}}{2}, \quad C_{2\text{опт}} = R_{\text{опт}}C_{2\max}, \quad (4)$$

где $C_{1\text{опт}}$ — оптимальные вероятные затраты на предупреждение аварии; $C_{2\text{опт}}$ — оптимальные вероятные затраты на страхование аварии, определяемые с учетом неравенства $R_{\text{опт}} \leq \text{Оц}_2(\Phi)$. Выражение (4) целесообразно использовать априори, чтобы задавать оптимальное значение показателя риска виртуальной аварии $R_{\text{опт}}$, как отношение оптимального значения стоимости технологии управления безопасностью (предупреждения аварии) $C_{1\text{опт}} = \varphi(R_{\text{опт}})$ к сто процентному значению затрат на устранение последствий виртуальной аварии $C_{2\max}$:

$$R_{\text{опт}} = \frac{C_{1\text{опт}}}{C_{2\max}}. \quad (5)$$

Обоснование конструктивных показателей безопасности ЭОО требует критического переосмысления принятого подхода к оценке безопасности. В частности, согласно нормативной документации¹ и литературным источникам по оценке безопасности АЭС, принята вероятностная модель события аварии [1–5, 13, 14]. Гипотеза вероятностной модели аварии имеет следующие методологические ограничения [7, 10]. Как известно, вероятность события аварии есть математический образ частоты события аварии, когда в практике наблюдается статистическая устойчивость частоты. Иначе говоря, вероятность события аварии может использоваться как модель аварии только тогда, когда закономерно и многократно наступает авария. Такая гипотеза имеет следующие противоречия. Во-первых, после тяжелой аварии (типа Чернобыльской) в принципе перестает существовать объект и поэтому

¹Общие положения обеспечения безопасности атомных станций при проектировании, сооружении и эксплуатации (ОПБ-88).

не может иметь место частота аварии. Во-вторых, требование постоянства частоты аварии противоречит сути управления безопасностью ЭОО, требующей исключения аварии из практики эксплуатации, а следовательно, и из теории обеспечения безопасности. В-третьих, так как при гипотезе постоянства частоты аварии и ограниченном сроке службы ЭОО число аварий конечно, то управление безопасностью является дискретным, что существенно ограничивает его надежность.

Альтернативой вероятностной гипотезе аварии является гипотеза “виртуальная авария” [6, 7, 11]. *Виртуальная авария (событие виртуальной аварии Φ) — предполагаемая авария, которая не имеет априорных закономерностей и практически не обязательна, но уникальная возможность которой теоретически не может быть исключена из-за неустранимых фундаментальных причин (отсутствия априорных закономерностей виртуальной аварии и погрешности технологии предупреждения аварии).*

В соответствии с гипотезой виртуальной аварии, управление безопасностью связано с использованием конструктивных показателей аварии, исключающих необходимость вероятностной гипотезы аварии. Конструктивные показатели основываются на теоретических положениях, изложенных в публикациях [6, 7, 9, 10, 12]. Согласно им, управление безопасностью ЭОО следует вести, используя контроль нормируемой аналоговой величины в процессе работоспособного состояния ЭОО. Такими нормируемыми и контролируруемыми аналоговыми случайными величинами являются активность и доза выброса РАВ, максимально допустимые значения которых устанавливаются, согласно с нормативными документами. Эти величины являются случайными (статистически устойчивыми) переменными и поэтому к ним применим вероятностный анализ.

С учетом изложенного простейшую модель анализа безопасности ЭОО (АЭС, хранилища РАО, химикатов и т. п.) целесообразно записать в следующем виде [7, 9, 10]:

$$P(Q_j \geq q_{\max}) = R \cdot P(Q_i \leq h_{\max}), \quad (6)$$

где Q_j — случайная информационная переменная, характеризующая активность (дозу) выбросов радиоактивных веществ (РАВ); Q_i — случайная информационная переменная, характеризующая активность (дозу) всей совокупности радионуклидов в реакторной установке; q_{\max} — максимально допустимое значение активности (дозы) выбросов РАВ; h_{\max} — максимальное значение активности (дозы) всей совокупности радионуклидов в реакторной установке; R — показатель риска виртуальной аварии из-за отказа подсистем предупреждения. Согласно формуле (6), показатель риска выбросов РАВ запишем так:

$$R = \frac{P(Q_j > q_{\max})}{P(Q_i \leq h_{\max})}. \quad (7)$$

Из-за отсутствия статистических данных с учетом максимальной энтропии полагают случайные информационные переменные Q_j и Q_i распределенными по равномерному закону [7, 10]. Тогда отношение вероятностей

$$\left[\frac{P(Q_j > q_{\max})}{P(Q_i \leq h_{\max})} \right] = \frac{q_{\max}}{h_{\max}}.$$

Если величина q равна максимально допустимому значению удельной активности (референтной дозы), установленных в НРБУ 97/2000, то максимально допустимое значение показателя риска аварии из-за отказа подсистем предупреждения аварии —

$$R_d \leq \frac{q_{\max}}{h_{\max}}. \quad (8)$$

Выражение максимально допустимого значения показателя риска виртуальной аварии из-за отказа подсистем предупреждения или защиты (8) имеет простую трактовку. Согласно алгебре логики, системы предупреждения и защиты аварии ЭОО должны обеспечить их безопасность, при которой удельная активность (референтная доза) выбросов Q_j не будет превышать нормативно допустимого значения q .

Выражение (8) является конструктивным показателем. С его помощью оценку максимально допустимого значения показателя риска R можно найти на основе прямых измерений в реальном масштабе времени на работающем ЭОО, не прибегая к концепции вероятностной закономерности аварии и ее оценкам.

Согласно (8), максимально допустимое значение показателя риска виртуальной аварии из-за отказа подсистем предупреждения —

$$R_d = \frac{q_{\max}}{h_{\max}}. \quad (9)$$

Норму (9) целесообразно использовать, чтобы оценить связь значения показателя безопасности ЭОО ($1-R_d$) с показателями надежности управляемого объекта (ЭОО и его элементов) — вероятности P_1 и подсистемы предупреждения аварии — вероятности P_2 . При этом следует различать нормальный режим, когда ЭОО функционирует безопасно без привлечения подсистемы предупреждения, и эксплуатационный режим, когда для обеспечения безопасности ЭОО используется подсистема предупреждения аварии [7, 12].

По аналогии с равенством (6) значение вероятности P_1 можно оценить по эксплуатационным данным, используя выражение

$$P(Q_j < q_n) = 1 - P(Q_j \geq q_n) = P_1 \cdot P(Q_i \leq h_n), \quad (10)$$

где q_n — максимально допустимое значение активности теплоносителя при нормальной эксплуатации; h_n — максимальное значение активности, которое может попасть в теплоноситель при нормальной эксплуатации.

Согласно выражению (10), вероятность можно описать как [7]

$$P_1 = 1 - \frac{q_n}{h_n}. \quad (11)$$

Для предупреждения аварии следует найти максимально допустимое значение эксплуатационного риска виртуальной аварии $R_{дэ}$, которая может произойти из-за отказа подсистем предупреждения. Учитывая максимальное значение допустимой эксплуатационной активности $q_э$ и выражение (10), максимально допустимое значение эксплуатационного риска —

$$R_{дэ} = \frac{q_э}{h_n}, \quad (12)$$

Показатель эксплуатационного риска $R_{дэ}$ связан с показателем надежности управляемого объекта P_1 и показателем надежности подсистемы предупреждения аварии P_2 следующим образом [7, 9–12]:

$$P_n = (1 - R_{дэ}) = \frac{P_1}{1 - P_2(1 - P_1)}. \quad (13)$$

Зная значения вероятностей P_1 (11) и эксплуатационного риска $R_{дэ}$ (12), согласно выражению (13), находим требуемое значение надежности подсистемы предупреждения аварии:

$$P_2 = \frac{P_n - P_1(1 - P_n)}{P_n}. \quad (14)$$

Чтобы найти требование к показателю надежности подсистемы защиты P_3 с учетом подсистемы предупреждения, необходимо оценить максимально допустимое значение риска виртуальной аварии [7, 12]:

$$R_{дэ} = \frac{q_э}{h_э}, \quad (15)$$

где $q_э$ — максимальное значение допустимой активности теплоносителя при достижении эксплуатационного предела; $h_э$ — максимальное значение активности, которое может попасть в теплоноситель при достижении эксплуатационного предела. Связь значения риска $R_{дэ}$ (15) с показателем надежности подсистемы защиты P_3 и показателем $P_н$ (13) имеет следующий вид:

$$(1 - R_{дэ}) = P_6 = \frac{P_н}{1 - P_3(1 - P_н)}. \quad (16)$$

Зная значения вероятностей $R_{дэ}$ (16) и $P_н$ (14), находим требование к показателю надежности подсистемы защиты [12]:

$$P_3 = \frac{P_6 - P_н}{P_6(1 - P_н)}. \quad (17)$$

В случае ПОО типа гидростанций затруднительно выбрать одну контролируемую безопасностью величину. Тогда следует определить совокупность контролируемых аналоговых величин Q_k , $k = \overline{1, z}$, а также значения q_k , определяющие границы управляемости работоспособным (безаварийным) состоянием объекта, где z — число контролируемых величин. Соответственно однозначный конструктивный показатель риска аварии — показатель потери управляемости объекта:

$$R = P\{Q_k > q_k, k = \overline{1, z}\}. \quad (18)$$

Если заданы предельные значения h_k , $k = \overline{1, z}$, выход за которые контролируемых величин Q_k , $k = \overline{1, z}$ означает переход объекта в аварийное состояние, то при допущении независимости случайных контролируемых величин максимально допустимое значение показателя риска потери управляемостью объекта —

$$R = P\{Q_k \geq q_k, k = \overline{1, z}\} = \prod_{k=1}^z \frac{q_k}{h_k}. \quad (19)$$

Максимально допустимые значения показателя риска потери управляемостью ПОО ((7), (15), (18) и (19)) являются конструктивными аналоговыми величинами, пригодными как для нормирования, так и для контроля. Они служат для управления работоспособным (безопасным) состоянием ПОО и для исключения его перехода в аварийное состояние.

В целом выполненный анализ позволяет заложить принципиально новый подход к нормированию показателей допустимого риска аварии, а на его основе и новые требования к надежности подсистем предупреждения и защиты от аварии, исходя из теории управления безопасностью. При этом обеспечивается конструктивность нормирования, которое не связано с вероятностной закономерностью аварии и поэтому может осуществляться без опоры на неконтролируемые исходные данные. Кроме того, вместо дискретного управления безопасностью, связанного с дискретной единицей измерения реактор/год (с числом

реакторов и лет эксплуатации), предлагается управление по аналоговой непрерывной величине (активности). Это в принципе меняет подход к теории управления безопасностью ЭОО (и, в частности, АЭС), позволяя разрабатывать высокоточные подсистемы предупреждения аварии.

Принципиально новой задачей оценки безопасности представляют объекты, которые не содержат вредных веществ (ВВ), но которые могут привести к экологической катастрофе из-за истощения ресурса.

В первую очередь, к таким объектам следует отнести гидросооружения, с которыми связаны огромные массивы воды, истощение ресурса которых грозит катастрофой из-за водной стихии. В случае анализа безопасности гидротехнических объектов (типа Днепрогэс, Киевского вдхр. и т.п.) их экологическая опасность из-за истощения ресурса не может быть оценена, согласно (8), так как эти объекты не содержат ВВ. Поэтому к определению допустимого значения показателя риска из-за истощения ресурса таких объектов требуется иной подход.

Учитывая методологическую и теоретическую связь технической и экономической эффективности, которая была рассмотрена ранее, целесообразно в основу формулировки допустимого значения показателя риска из-за истощения ресурса указанных объектов использовать экономическую эффективность. Исходя из этого, было удобно применять методологию оценки показателя риска (5), учитывая расходы на предупреждение аварии из-за истощения ресурса и вероятные затраты на устранения ее последствий.

Согласно данному положению, целесообразно ввести понятие **показателя допустимого экономического ущерба** $R_{y,x}$ для разных x -сценариев аварии из-за истощения ресурса:

$$R_{y,x} = \frac{C_{1x}}{C_{2 \max x}}, \quad (20)$$

где C_{1x} — затраты на предупреждение аварии для x -го сценария; $C_{2 \max x}$ — прогнозируемый максимальный ущерб для x -го сценария аварии. Исследуя разные x -варианты сценариев аварии, следует найти оптимальное значение показателя допустимого экономического ущерба $R_{y \text{ опт}}$, используя следующие соотношения:

$$R_{y \text{ опт}} = R_{y,x} : \left\{ R_{y,x} = \frac{C_{1x}}{C_{2 \max x}} \text{ при } \min(C_{1x} + C_{2x}), C_{2x} = R_{y,x} C_{2 \max x} \right\}. \quad (21)$$

Затем необходимо разработать меры по предупреждению аварии, учитывая значение показателя допустимого экономического ущерба $R_{y,x}$, а также затраты C_{1x} и $C_{2 \max x}$. Фактически следует своевременно заменить старый (исчерпавший γ -процентный ресурс) объект новым до наступления предельного состояния старого объекта.

Важной задачей является оценка z -воздействия окружающей среды на виртуальную аварию ЭОО. В частности, к таким z -воздействиям относятся землетрясение, наводнение, падение самолета или метеорита и т.п. [14]. Рассматривая z -й вид воздействия, следует учесть его прогнозируемую частоту λ_z и максимальный прогнозируемый ущерб от воздействия $C_{2 \max z}$. Используя данные о частоте λ_z , можно найти среднее значение (математическое ожидание) случайного времени z -воздействия:

$$T_{z \text{ ср}} = \frac{1}{\lambda_z}. \quad (22)$$

Важно отметить два варианта. *Первый вариант:*

$$T_{z\text{cp}} \ll \tau. \quad (23)$$

Например, для приповерхностного хранилища долгоживущих РАО, период полураспада которых составляет 10^6 лет, требуемый срок службы (ресурс) хранилища $\tau = 10^6$ лет [10]. Если в этом случае среднее время, например, землетрясения составляет $T_{z\text{cp}} = 10^2$ лет, тогда землетрясение следует рассматривать как статистически закономерное. Когда для x -го сценария аварии, связанного с z -воздействием, затраты на хранилище C_{1x} и максимальный прогнозируемый ущерб $C_{2\text{max}x}$ удовлетворяют условию экологической катастрофы:

$$C_{2\text{max}x} \gg C_{1x}, \quad (24)$$

тогда, согласно условиям (22), (23), для хранения долгоживущих РАО следует использовать геологическое хранилище [10]. *Второй вариант:*

$$T_{z\text{cp}} \gg \tau. \quad (25)$$

Например, для приповерхностного хранилища РАО, период полураспада которых составляет $3 \cdot 10^2$ лет, требуемый срок службы хранилища $\tau = 3 \cdot 10^2$ лет [10]. Если ресурс $\tau = 3 \cdot 10^2$ лет, а среднее время z -воздействия, например, землетрясения $T_{z\text{cp}} = 10^6$ лет, то время появления землетрясения следует рассматривать как случайную величину χ_z , распределенную по экспоненциальному закону. Тогда вероятность землетрясения в течение срока службы τ :

$$P_z = P\{\chi_z < \tau\} = e^{-\lambda_z \cdot \tau} \approx \frac{\tau}{T_{z\text{cp}}} \quad \text{при} \quad T_{z\text{cp}} \gg \tau. \quad (26)$$

Соответственно вероятный прогнозируемый ущерб от z -воздействия

$$C_{2z} = P_z C_{2\text{max}z}. \quad (27)$$

Зная максимально допустимое значение риска виртуальной аварии $R_{дб}$ (16) и прогнозируемый максимальный ущерб $C_{2\text{max}}$, можно найти вероятный прогнозируемый ущерб (без учета внешнего воздействия):

$$C_{2y} = R_{дб} C_{2\text{max}}. \quad (28)$$

Общий прогнозируемый ущерб

$$C_{2x} = C_{2y} + C_{2z}. \quad (29)$$

Учитывая соотношение между затратами на безопасность хранилища C_{1x} и общим прогнозируемым ущербом от аварии C_{2z} , следует принять решение о типе хранилища и управлении его безопасностью.

Рассмотренная система конструктивных показателей оценки влияния ЭОО на окружающую среду может служить основой для разработки нормативно-технической документации по управлению безопасностью.

1. Хенли Э. Д., Кумато Х. Надежность технических систем и оценка риска. – Москва: Машиностроение, 1979. – 528 с.

2. Уивер Л. Риск от аварии на АЭС с легководными реакторами // Безопасность ядерной энергетики. – Москва: Атомиздат, 1980. – С. 114–133.
3. Бегун В. В., Горбунов О. В., Каденко И. Н. Вероятностный анализ безопасности атомных станций. – Киев: Фирма “Випол”, 2000. – 568 с.
4. Рябинин И. А. Надежность и безопасность сложных систем. – Санкт-Петербург: Политехника, 2000. – 248 с.
5. Острейковский В. А., Швыряев Ю. В. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ. – Москва: Наука, 2008. – 352 с.
6. Лисиченко Г. В., Пампуро В. И., Войчек В. Возможен ли второй Чернобыль? // Проблеми і шляхи вирішення: Тр. VII Міжнар. наук.-практ. конф. “Екологічна безпека”, верес. 7–17, 2011, Алушта. – 36. наук. праць. – Харків: УкрНДІЕП, 2011. – С. 109–119.
7. Пампуро В. И. Оптимальное управление безопасностью экологически опасных объектов. – Киев: Наук. думка, 2012. – 599 с.
8. Пампуро В. И. Управление безопасностью объектов атомной энергетики согласно концепции виртуальной аварии // Доп. НАН України. – 2007. – № 11. – С. 198–204.
9. Пампуро В. И. Структурная информационная теория надежности систем. – Киев: Наук. думка, 1992. – 324 с.
10. Пампуро В. И. Максимальная безопасность при минимуме возможных затрат // Доп. НАН України. – 2006. – № 5. – С. 185–190.
11. Шестопалов В. М., Пампуро В. И., Шибецкий Ю. А. Проблемы оптимального управления безопасностью геологического захоронения радиоактивных отходов. – Киев: Б. и., 2008. – 171 с.
12. Борисенко В. И., Ключников А. А., Пампуро В. И. Обоснование показателей безопасности АЭС // Пробл. безпеки атом. електростанцій і Чорнобиля. – 2011. – Вып. 15. – С. 6–12.
13. Основные принципы безопасности атомных станций: Отчет Междунар. консульт. группы по ядер. безопасности. Сер. Безопасности 75. INSAG-3, Rev. 1, INSAG-12. – Вена: МАГАТЭ, 1989.
14. Лисиченко Г. В., Забулонов Ю. Л., Хміль Г. А. Природный, техногенный та екологічний ризику: аналіз, оцінка, управління. – Київ: Наук. думка, 2008. – 542 с.

ГУ “Институт геохимии окружающей среды
НАН Украины”, Киев

Поступило в редакцию 16.03.2012

V. I. Pampuro

Система показників екологічної безпеки об'єктів

Розглядаються узагальнені конструктивні показники безпеки об'єктів. Обґрунтована система конструктивних показників небезпеки об'єктів постійної екологічної загрози та потенційно небезпечних внаслідок обмеженого ресурсу.

V. I. Pampuro

A system of indicators of environmental safety of objects

The generalized design parameters of environmental safety of objects are considered. A system of design safety parameters for objects, which are sources of a constant ecological hazard and are potentially dangerous due to the exhaustion of a resource, is substantiated.