ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТЬЮ АЭС И МЕТОД ДЕРЕВА СОБЫТИЙ

В.И. Пампуро, В.И.Борисенко

Вероятностный анализ опасности АЭС нашел широкое применение в теории и практике обеспечения безопасности АЭС [1-4]. На его основе заложены требования к вероятности допустимого риска от АЭС в нормативно-технических документах [5-7]. Однако, несмотря на жестокую критику [8,9], методологические ограничения этого анализа и его место в теории управления безопасностью АЭС не рассмотрены. Рассмотрим эти ограничения согласно следующим основным положениям теории оптимального управления безопасностью АЭС [10-18].

1. Управление безопасностью не является самостоятельной проблемой. Экономически она связана с проблемой максимизации прибыли и решается с помощью наукоемкой технологии оптимального управления безопасностью. Необходимо обоснование допустимого, приемлемого значения показателя риска по критерию экономической эффективности путем минимизации затрат и оптимального их перераспределения между технологиями предупреждения аварий (отказов) и устранения их последствий на основе многокритериальной оптимизации [13,16].

2. В отдельности ни одна теория не в состоянии обеспечить оптимальное управление. Существующие теории анализа риска (безопасности) и надежности локальные. Каждая локальная теория имеет неизбежные методологические ограничения и методические погрешности, устранить которые можно только путем синтеза с другими на основе системной теории. Теория оптимального управления безопасностью АЭС является системной: она служит для управления безопасностью во взаимосвязи с локальными теориями путем их структурного синтеза в общий алгоритм оптимального управления безопасностью [10-13].

3. Оптимальное управление безопасностью АЭС требует учета взаимосвязи детерминистических и стохастических закономерностей появления аварий, а также уникальных аварий. Детерминистические законы определяют свойства объекта, а стохастические - свойства совокупности объектов в условиях статистической устойчивости (при постоянной частоте событий). Потенциально опасный объект статистически неустойчивая система. Индивидуальное управление им всегда связано с регулированием состояния конкретного объекта в конкретных условиях согласно детерминистическим законам. Поэтому нельзя использовать вероятностный анализ безопасности в качестве основополагающего в теории управления [15].

4. Оптимальное управление безопасностью состоит в сочетании технологий предупреждения аварии и устранения ее последствий. Технология устранения последствий есть управление по критерию аварии. Она низкодостоверная и малоэффективная из-за дискретного принципа управления. Технология предотвращения аварии служит для управления безопасностью в пределах обратимых процессов функционирования АЭС (до наступления аварии). Она наиболее эффективна, когда управление ведется по аналоговой величине и основано на физических и информационных моделях объекта в сочетании с моделями связи объекта с технологиями управления по состоянию в пределах обратимых процессов его функционирования [15,17].

5. Аварии, грозящие экологическими катастрофами, являются уникальными. Для них нельзя определить детерминистические или стохастические закономерности (и, следовательно, применить теорию вероятности из-за отсутствия частоты аварий). К ним относятся аварии с плавлением активной зоны и выбросом большого количества радиоактивных веществ. Оценкой сверху риска таких аварий является вероятность погрешности технологического процесса предупреждения аварии, а оптимальное управление состоит в минимизации суммарных затрат путем оптимального их

перераспределения между технологиями предупреждения аварии и устранения ее последствий [16].

6. Из-за сложности проблемы оптимального управления безопасностью АЭС и связанного с этим участием большого количества разноплановых специалистов многие задачи управления рассматриваются самостоятельно без научной увязки с решением других задач. Вследствие этого практически полностью отсутствует обоснование экономической и технической эффективности принимаемых решений, что приводит к огромным потерям. Необходима наукоемкая компьютерная технология оптимального управления безопасностью, обеспечивающая сочетание экономической и технической эффективности с позиций максимизации прибыли [12-16].

7. Теория оптимального управления безопасностью построена на сочетании детерминистического и стохастического подходов как взаимно дополняющих друг друга [10-18]. Согласно ей каждый элемент структуры характеризуется входными и выходными информационными переменными. Информационная переменная $\mathbf{Q_i}$ есть контролируемая, измеряемая, диагностируемая, вычисляемая, транслируемая, преобразуемая по заданному закону или регулируемая величина, прямо или косвенно связанная с определением состояния и управлением состоянием объекта (элемента). Для описания объекта с системами управления и защиты необходимо использовать представления об информационной переменной как о множестве--событии потока информации, измеряемом с помощью меры (вероятности для случайных или интегрального веса для детерминированных переменных). Все события рассматриваются как подмножества одного и того же множества, в частности пространства элементарных событий [10,11]. Они могут рассматриваться как случайные или детерминистические в зависимости от того, какие переменные используются для определения этих событий. При анализе безопасности АЭС событие входного потока информации θ_i' определяет массу радиоактивных веществ в реакторе до аварии, а событие выходного потока информации θ_j - массу радиоактивных веществ, оставшихся в реакторе после аварии. Тогда событие выброса радиоактивных веществ равно $\theta_B = \theta_i' - \theta_j$. Кроме событий потоков информации используется понятия событий работоспособности ε_{r1} (отказа $\bar{\varepsilon}_{r1}$) каждого элемента **r1**, определяющее условия прохождения (потерь) информации через него и выражаемое через множество значений параметров элемента **r1**.

В общем случае событие выходного потока информации θ_j равно объединению события собственного потока информации θ'_j и событий проходящих через ребра **ji** потоков информации $\varepsilon_{ji}\theta_{ji}$:

$$\theta_j = \theta'_j + \bigcup_i \varepsilon_{ji}\theta_{ji} = \theta'_j + \bigcup_i \varepsilon_{ji}\theta_i , \qquad \varepsilon_{ji}\theta_i = \varepsilon_{ji}\theta_{ji} , \qquad j=\overline{1,n} \qquad (1)$$

где событие собственного потока информации

$$\grave{e}'_j = \grave{e}_j \qquad \text{при} \qquad \theta'_i = \varnothing, \qquad (i = \overline{1,n}) \wedge (i \neq j).$$

Важно отметить, что вид соединения элементов по надежности (безопасности) определяется через вид связи событий потоков информации каждого элемента. В результате в теорию управления безопасностью вводится все многообразие соединений элементов, включая соединение по схеме стохастической обратной связи, что позволяет отобразить законы связи объекта и его систем управления в технологии обеспечения безопасности АЭС. Соответствующая структурная схема реактора с системами управления учитывает эффективность эшелонированной защиты АЭС и различие влияний каждого элемента реактора и систем на безопасность АЭС. Из теории стохастической обратной связи следует принцип преобразования экологически опасного объекта в экологически безопасную систему за счет высоконадежной и безопасной эшелонированной защиты, формулируемый согласно следующей теореме [12].

<u>Теорема.</u> Если система, состоящая из объекта **ji** и цепи обратной связи **ij**, может функционировать в двух образующих полную группу состояниях Ω_1 и Ω_2 так, что событие собственного входного потока θ_i' и события $\varepsilon_{ji}, \varepsilon_{ij}$, определяющие функционирование ее компонента **ji** и **ij**, удовлетворяют условиям

$$\varepsilon_{ji}\theta_i' = \Omega_1\varepsilon_{ji}\theta_i', \qquad \Omega_1\varepsilon_{ij} = \varnothing \text{ и } \varepsilon_{ji}\bar{\varepsilon}_{ij} \neq \varnothing,$$

то вероятность события выходного потока информации системы

$$P(\theta_j) = \frac{P(\varepsilon_{ji}')}{1 - P(\varepsilon_{ij})P(\varepsilon_{ji}'')} P(\theta_i'),$$

где $\varepsilon_{ji}' = \Omega_1\varepsilon_{ji}, \qquad \varepsilon_{ji}'' = \Omega_2\varepsilon_{ji},$ **(2)**

Согласно (2) надежность системы **P** может быть существенно повышена в $1/\{1-P(\varepsilon_{ij})P(\varepsilon''_{ji})\}$ раз за счет обратной связи:

$$P = \frac{P(\varepsilon_{ji}')}{1 - P(\varepsilon_{ij})P(\varepsilon_{ji}'')} \qquad \textbf{(3)}$$

Выражение (3) позволяет оценить эффективность эшелонированной защиты АЭС.

При достоверном событии входного потока информации вероятность события выброса радиоактивных веществ в окружающую среду

$$P(\theta_B) = \frac{P(\varepsilon_{ji}'')\{1 - P(\varepsilon_{ij})\}}{1 - P(\varepsilon_{ij})P(\varepsilon_{ji}'')} . \qquad \textbf{(4)}$$

Последнее выражение определяет вероятность риска аварии объекта с системой защиты от аварии. Сумма вероятностей

$$P + P(\theta_B) = 1 \qquad \textbf{(5)}$$

На основании приведенного анализа заметим, что вероятностный анализ безопасности экологически опасных объектов не является универсальным, его следует использовать в теории управления безопасностью с учетом приведенных выше ограничений. Одностороннее использование теории вероятностей как теоретической основы обеспечения безопасности приводит к принципиальным недостаткам, которые рассмотрим на примере анализа метода дерева событий [1-3].

Дерево событий представляет собой логический метод перебора всех возможных последовательностей (путей) сочетаний исходного события с событиями работоспособности и отказа влияющих на развитие аварии систем, выбираемых исследователем по своему усмотрению. Основные положения метода состоят:

- в выборе исходного события $\mathring{a}_A$, а также событий работоспособности $\mathring{a}_k$ и неработоспособности $\mathring{a}_k$ систем, с которыми могут быть связаны сценарии аварий, $k = \overline{1,n}$;
- в построении дерева событий, состоящего из исходного события $\bar{\varepsilon}_A$ как входного и путей (веток), с каждым из которых связанно несовместное событие пути w_x равное произведению независимых **ε**-событий соответствующих систем ($x = \overline{1,h}$, $h = 2^n$), и в определении вероятности пути как произведения вероятностей его **ε**-событий;
- в определении риска возможности аварии путем суммирования вероятностей всех событий путей дерева.

Принципы построения дерева событий основаны на формальной математической логике перебора всех возможных комбинаций **ε**-событий систем. Событие возможных аварий

$$\bar{\theta}^{A}_{вых} = (\bigcup_{x \in L} w_x)\bar{\varepsilon}_A, \qquad (6)$$

где **L={x}** множество аварийных состояний системы. Соответственно вероятность риска аварии для независимого исходного события

$$P^{A}_{рис} = P(\bar{\theta}^{A}_{вых}) = [\sum_{x \in L} P(w_x)] \quad P(\bar{\varepsilon}_A). \qquad (7)$$

Так как совокупность несовместных событий w_x всегда образует полную группу событий независимо от количества и типов выбранных систем (и, следовательно, независимо от глубины защиты !), то вероятность совокупности

$$\sum_{x \in L} P(w_x) = 1. \qquad (8)$$

Поэтому вероятность риска аварии из-за одного исходного события $\vec{a}_A$

$$P^{A}_{рис} = P(\bar{e}^{A}_{вых}) = P(\vec{a}_A). \qquad (9)$$

Общая (суммарная) вероятность риска из-за всей совокупности **H** исходных событий $\{\vec{a}_A\}$, где $A \in H$, равна сумме вероятностей (9):

$$P_{рис} = \sum_{A \in H} P(\bar{e}^{A}_{вых}) = \sum_{A \in H} P(\vec{a}_A) \quad . \qquad (10)$$

Объединение событий ($\bigcup_{x \in L} w_x$) является достоверным, так как совокупность $\{w_x\}$ образует полную группу событий. С учетом этого событие возможных аварий $\bar{\theta}^{A}_{вых}$ (6) из-за одного исходного события $\bar{\varepsilon}_A$ равно

$$\bar{\theta}^{A}_{вых} = \bar{\varepsilon}_A. \qquad (11)$$

Тогда событие риска аварии $\bar{\theta}_{вых}$ из-за всей совокупности **H={A}** исходных событий $\bar{\varepsilon}_A$ равно

$$\bar{\theta}_{вых} = \bigcup_{A \in H} \bar{\varepsilon}_A \qquad (12)$$

соответственно противоположные событие - событие отсутствия риска аварии

$$\theta_{вых} = \bigcap_{A \in H} \varepsilon_A, \qquad (13)$$

где ε_A – событие, противоположное событию $\bar{\varepsilon}_A$. Событие $\theta_{вых}$ определяет последовательное соединение элементов, с которыми связаны события ε_A**.** Это положение соответствует классической теории надежности, согласно которой структура системы без дублирования технологических функций есть последовательное соединение ее элементов. Согласно такой структуре ее надежность с учетом систем защиты не повышается, а понижается. Следовательно, модель безопасности, получаемая согласно методу дерева событий, противоречит основной концепции обеспечения безопасности АЭС за счет эшелонированной защиты.

Метод дерева событий имеет следующие методологические ограничения:

1. Принцип построения дерева событий (далее принцип) на основе логического перебора событий работоспособности $\mathring{a}_k$ и неработоспособности $\vec{a}_k$ систем, связанных со сценарием аварии, является сугубо абстрактным. Он противоречит сути законов связи объекта и его систем управления в технологии обеспечения безопасности АЭС. Поэтому на его основе нельзя построить математическую модель, адекватную технологии с многоконтурными цепями управления;

- исключает теорию обратной связи и поэтому полностью не пригоден как основа теории управления безопасностью АЭС;

- не позволяет сформулировать условия преобразования экологически опасного объекта (реактора) в экологически безопасную систему за счет эшелонированной защиты, являющейся методологической основой технологии управления безопасностью АЭС [6].

2. Оценка вероятности аварии по критерию отказов систем позволяет влиять только на технологию устранения последствий аварии. Она не учитывает взаимодействие этой технологии с технологией предупреждения аварии, являющейся наиболее перспективной и эффективной в обеспечении безопасности АЭС. Поэтому этот метод не пригоден для оптимизации управления безопасностью АЭС, которое можно обеспечить только за счет оптимального взаимодействия технологии предупреждения аварии с технологией устранения ее последствий [15-18].

3. Метод дерева событий не пригоден для определения оптимальных требований к надежности систем АЭС при заданном значении вероятности допустимого риска аварии: так как структура дерева событий симметрическая, то оптимальные требования к надежности всех систем одинаковы, независимо от влияния систем на технологию обеспечения безопасности АЭС [14].

4. Вероятностный анализ так называемых “маловероятных событий”, которые “никогда не наблюдались” [2], и событий (типа плавления активной зоны) является некорректным, так как при отсутствии частоты появления события в принципе не применима вероятностная мера [12]. Ограничение анализа безопасности исключительно случайными событиями и отсутствие анализа детерминистических, а также уникальных событий не позволяет использовать метод дерева событий для минимизации ущерба от тяжелых аварий АЭС [15-18].

5. Приводимые в расчетах значения вероятности аварии порядка 10^{-7}-10^{-5} реактор/год [1-3,5-7] не имеют под собой практического смысла и теоретически некорректны. Они являются следствием ошибочного использования модели неограниченной и непрерывной случайной величины для аппроксимации конечного и дискретного времени наступления аварии [15,17].

6. В целом математический аппарат, как и принцип построения дерева событий противоречат технологии обеспечения безопасности АЭС за счет эшелонированной защиты, являющейся основополагающей [6].

С целью иллюстрации вышеизложенного рассмотрим пример крупной аварии АЭС с потерей теплоносителя [1,2]. Исходным событием $\mathbf{A=\varepsilon_A}$ является разрыв трубопровода. События работоспособности систем, с которыми возможно развитие аварии, следующие: **B** - система электроэнергии; **C** - система аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ); **D** - система удаления продуктов деления; **E** - система защитной оболочки. Вероятности этих событий обозначаются соответственно $\mathbf{P_A}$, $\mathbf{P_B}$, $\mathbf{P_C}$, $\mathbf{P_D}$, и $\mathbf{P_E}$, а вероятности противоположных событий (отказов) - $\mathbf{R_A}$, $\mathbf{R_B}$, $\mathbf{R_C}$, $\mathbf{R_D}$ и $\mathbf{R_E}$. Дерево событий для этой аварии приведено на рис.1а. Количество путей аварии равно 2^4 =16. Для достоверного исходного события **A** совокупность событий всех 16 путей дерева рис.1а образует полную группу. То же замечание относится и к рис.1 б (где устранены нелогичные пути дерева 1а), так как перебираются все практически возможные пути [2]. Поэтому вероятность риска тяжелой аварии с потерей теплоносителя равна вероятности исходного события $\mathbf{R_A=P(\varepsilon_A)}$ (6). Следовательно, системы защиты (САОЗ, системы удаления продуктов деления и системы защитной оболочки) никак не влияют на вероятность риска и на эффективность защиты АЭС (!).

Корректный анализ раздельного влияния отказа каждой системы на безопасность АЭС (в отличие от метода дерева событий) возможен на основе теории чувствительности [10]. Анализ влияния каждого аргумента $\mathbf{P_i}$, $\mathbf{i=\overline{1,n}}$ производится по линейному уравнению относительной погрешности функции надежности $\mathbf{P = f\,(P_1,P_2,\ldots,P_n)}$:

$$\delta P=S_1\delta P_1+ S_2\delta P_2 +\ldots+S_n\delta P_n, \qquad (14)$$

где относительные погрешности

$$\delta P=(P-P_0)/P_0 \quad \text{и} \quad \delta P_i=(P_i-P_{i0})/P_{i0}, \; i=\overline{1,n} \qquad (15)$$

находятся как отклонения от ненулевых значений аргументов P_{i0} и функции $P_0=f\,P_{10},P_{20},\ldots,P_{n0})$. Функции чувствительности

$$S_i=(\partial P/\partial P_i)(P_{i0}/P_0), \qquad i=\overline{1,n}. \qquad (16)$$

Уравнение относительной погрешности (14) позволяет порознь оценить вклад относительной погрешности в δP_i каждого аргумента P_i функции P.

При анализе безопасности расчетное значение вероятности безопасного функционирования объекта P близко к единице. Например, по рекомендациям нормативных документов значение $P \geq 1\text{-}10^{-5}$ [6.7]. Поэтому можно положить $\delta P \approx 1\text{-}P$. Значения вероятностей надежной работы элементов P_i значительно меньше значения P. Для оборудования наиболее реальными являются значения P_i = 0,99. Учитывая это, запишем связь вероятностей отказов $(1 - P_i) = R_i$ с значением вероятности риска $(1 - P) = P_{рис}$ в следующем виде:

$$P^*_{рис} \cong S^*_1 R_1 + S^*_2 R_2 + \ldots + S^*_n R_n, \qquad (17)$$

где из условия $S_i R_i / P_i = S^*_i R_i$ приведенная функция чувствительности

$$S^*_i = S_i / P_i, \qquad i=\overline{1,n}. \qquad (18)$$

Анализ уравнения погрешности (17) позволяет учесть вклад $S^*_i R_i$ вероятности отказа R_i каждого i-го элемента в вероятность отказа системы $P^*_{рис}$ и сопоставить тем самым влияния отказов элементов на риск аварии системы. Если положить вероятности отказов элементов $\overline{P}_i$ равными друг другу, то оценку влияния элементов можно производить с помощью функций чувствительности S^*_i.

Выражение (17) по форме совпадает с используемым в методе дерева событий суммарным риском (10). Однако по сути они имеют принципиальные различия.

Во-первых, выражение (10) получается суммированием вероятностей исходных событий без учета действия эшелонированной защиты.

Во-вторых, исходные события полагаются несовместными, в результате чего при большом их числе вероятность риска (10) может быть больше единицы.

В-третьих, согласно выражению (10) все вероятности исходных событий одинаково влияют на суммарный риск, что не позволяет оптимизировать соотношения между требованиями к надежности и стоимости реактора и его систем защиты.

В целом выражение суммарного риска (10) не пригодно для оптимального управления безопасностью АЭС.

Рассмотрим этот пример с позиций теории управления безопасностью [10-12]. Обозначим: вероятность безотказности первого технологического контура P_K, а вероятность отказа $R_K = R_A$. Вероятность отсутствия аварии для первого эшелона защиты (рис. 2а)

$$P_{Э1} = P_K / (1\text{-}P_B P_C P_D R_K). \qquad (19)$$

Вероятность риска аварии для первого эшелона защиты согласно (17)

$$\widetilde{R}_{Э1} \cong S^*_{B1} R_B + S^*_{C1} R_C + S^*_{D1} R_D + S^*_{K1} R_K, \qquad (20)$$

где S^*- чувствительности согласно выражениям (16), (18) равны

$$S^*_{B1} = P_C P_D R_K / H_1; \quad S^*_{C1} = P_B P_D R_K / H_1; \quad H_1 = 1 - P_B P_C P_D R_K;$$
$$S^*_{D1} = P_B P_C R_K / H_1; \quad S^*_{K1} = (1 - P_B P_C P_D) / H_1 P_K. \qquad (21)$$

Вероятность отсутствия аварии для второго эшелона защиты (рис. 2б)

$$\mathbf{P_{Э2} = P_{Э1} / (1-P_E R_{Э1}).} \qquad \mathbf{(22)}$$

Вероятность риска аварии для второго эшелона защиты согласно (17)

$$\tilde{\mathbf{R}}_{Э2} \cong \mathbf{S^*_{B2} R_B + S^*_{C2} R_C + S^*_{D2} R_D + S^*_{E2} R_E + S^*_{K2} R_K}, \qquad \mathbf{(23)}$$

где **S***- чувствительности согласно выражениям (16), (18) равны:

$$\mathbf{S^*_{B2} = P_C P_D R_K R_E / H_1 H_2; \quad S^*_{C2} = P_B P_D R_K R_E / H_1 H_2; \quad H_2 = 1 - P_E R_{Э1};}$$
$$\mathbf{S^*_{D2} = P_B P_C R_K R_E / H_1 H_2; \quad S^*_{E2} = R_{Э1}/H_2; \quad S^*_{K2} = (1 - P_B P_C P_D) R_E / H_1 H_2 P_K} \qquad \mathbf{(24)}$$

Вероятности риска аварии можно вычислить по другим очевидным формулам:

$$\mathbf{R_{Э1} = 1-P_{Э1}, \qquad R_{Э2} = 1-P_{Э2}} \qquad \mathbf{(25)}$$

С учетом погрешностей вычислений наиболее точными являются следующие выражения [10]:

$$\mathbf{R^T_{Э1} = R_K (1 - P_B P_C P_D) / H_1, \quad R^T_{Э2} = R_{Э1} R_E / H_2} \qquad \mathbf{(26)}$$

Относительные погрешности вычислений равны:

$$\boldsymbol{\delta}_{11} = (|\mathbf{R^T_{Э1} - R_{Э1}}|) / \mathbf{R^T_{Э1}}, \qquad \mathbf{(27)}$$

$$\boldsymbol{\delta}_{12} = (|\mathbf{R^T_{Э1} - \tilde{R}_{Э1}}|) / \mathbf{R^T_{Э1}}, \qquad \mathbf{(28)}$$

$$\boldsymbol{\delta}_{21} = (|\mathbf{R^T_{Э1} - R_{Э2}}|) / \mathbf{R^T_{Э2}}, \qquad \mathbf{(29)}$$

$$\boldsymbol{\delta}_{22} = (|\mathbf{R^T_{Э2} - \tilde{R}_{Э2}}|) / \mathbf{R^T_{Э2}}. \qquad \mathbf{(30)}$$

Чувствительности $\mathbf{S^*_{K1}}$ и $\mathbf{S^*_{K2}}$ меньше единицы, причем $\mathbf{S^*_{K1} >> S^*_{K2}}$. Из примера видно как влияют эшелоны защиты на вероятность риска.

Заключение

Оценивая метод дерева событий заметим, что он способствует систематизации знаний специалистов разработчиков по обеспечению безопасности АЭС на экспертной основе. Однако он имеет существенные методические погрешности, которые не позволяют использовать его для оценки риска тяжелой уникальной аварии типа плавления активной зоны. Согласно эксплуатационным данным и теоретическому анализу эти аварии статистически неустойчивые [15,17]. Полученный вывод имеет принципиальное значение - исключается закономерность появления тяжелой аварии, что открывает путь к устранению возможности практического появления тяжелых аварий. Согласно этому выводу следует исключить имеющиеся в нормативно-технической документации нормы на вероятность аварии с выбросом радиоактивных отходов как противоречащие основной концепции обеспечения безопасности за счет эшелонированной защиты [5,7], поскольку при вероятностной гипотезе аварии она неизбежна вне зависимости от количества эшелонов защиты [15,17].

Оптимальное управление безопасностью АЭС за счет глубокоэшелонированной защиты впервые обосновано в структурной теории, которая дополняет экспертный анализ и вместе с ним позволяет обеспечить эффективность управления безопасностью АЭС [10-18]. С позиций оптимального управления безопасностью с учетом предположений об уникальных авариях следует минимизировать затраты на управление безопасностью и оптимизировать их перераспределение между технологией предупреждения аварии и технологией устранения ее последствий [16]. При этом вероятные затраты на технологию устранения последствий уникальной аварии определяются сверху через вероятность погрешности технологии предупреждения аварии. Определение этой вероятности требует разработки физических, метрологических и информационных моделей как объекта управления, так и систем управления, а также информационных моделей связи объекта с его системами управления.

Решение задач оптимального управления безопасностью по критериям технической и экономической эффективности связано с разработкой наукоемких компьютерных технологий, требующих взаимодействия специалистов разного профиля на системной основе [10,19]. Причем экспертный анализ с использованием идей метода событий является исходным для последующего построения математических моделей оптимального управления.

ЛИТЕРАТУРА

1.Хенли Э.Д., Кумато. Надежность технических систем и оценка риска. -М.: Машиностроение, 1979. 528 с.

2.Уивер Л. Риск от аварии на АЭС с легководными реакторами.. Безопасность ядерной энергетики. -М.: Атомиздат, с.114-133.

3.Вероятностный анализ безопасности атомных станций. Методика выполнения. Швыряев Ю.В. и др./- М: ИАЭ им.Курчатова, 1992.-266 с.

4.Андриенко А.Я., Портиков-Соколов Ю.П. Формирование риска при обеспечении безопасности технически сложных систем// Приборы и системы управления.-1996.-№12,-с. 11-12.

5.Вероятностный анализ по безопасности INSAG-6. Доклад Международной консультативной группы по ядерной безопасности. Вена, Международное агентство по атомной энергии, 1994. 25 с.

6.Общие положения обеспечения безопасности атомных станций при проектировании, сооружении и эксплуатации (ОПБ-88). -М.: Минэнерго СССР, 1989.

7.Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций ПБЯ РУ АС-89. М.: Минэнерго СССР, 1990.

8.Trauble K.,u.a.Nach dem Supper-Gru. Tschernobyl und die Konsequenzen: Reinbak, 1986. S.73.

9.Либман Жак. Безопасность французских ядерных установок и методы ее анализа. -Институт по защите и ядерной безопасности, 1993-297 с.

10.Пампуро В.И. Структурная информационная теория надежности систем. К.: Наукова думка, 1992. 324с.

11.Пампуро В.И. Управление надежностью электроэнергетических объектов // Электричество, 1991б № 12, с.15-21.

12.Пампуро В.И. Метод разработки математических моделей управления экологической безопасностью объектов. Доповіді НАН України, 1999, №1, с.197-203.

13.Пампуро В.И. Наукоемкие системы управления качеством экологически опасного объекта. Киев,1997-73 с. (Препр..НАН Украины. Ин-т электродинамики № 798).

14. Пампуро В.И. Обеспечение экологической безопасности модернизируемых АС. Доповіді НАН України, 1999, № 8, с.190-196.

15.Пампуро В.И. Анализ достоверности технологии управления экологической безопасностью объектов по критерию аварии. Доповіді НАН України, 2000 , № 5, с.

16.Пампуро В.И. Многокритериальная оптимизация технологии предупреждения экологической катастрофы из-за тяжелой аварии объекта.// Доповіді НАН України, 2000, (в печати).

17.Пампуро В.И. Анализ методологии управления безопасностью крупных объектов по критерию аварии. Праці Інституту електродинаміки НАН України. Електротехніка. Київ, 1999, с.222-237.

18.Пампуро В.И. Оптимальное управление безопасность АЭС и вероятностный анализ риска.// Доповіді НАН України, 2000, (в печати).

19.Пампуро В.И. Проблемы эффективности модернизации энергетики в условиях перехода к рынку// Технична електродинамика, 2000, №1, с.74-78.

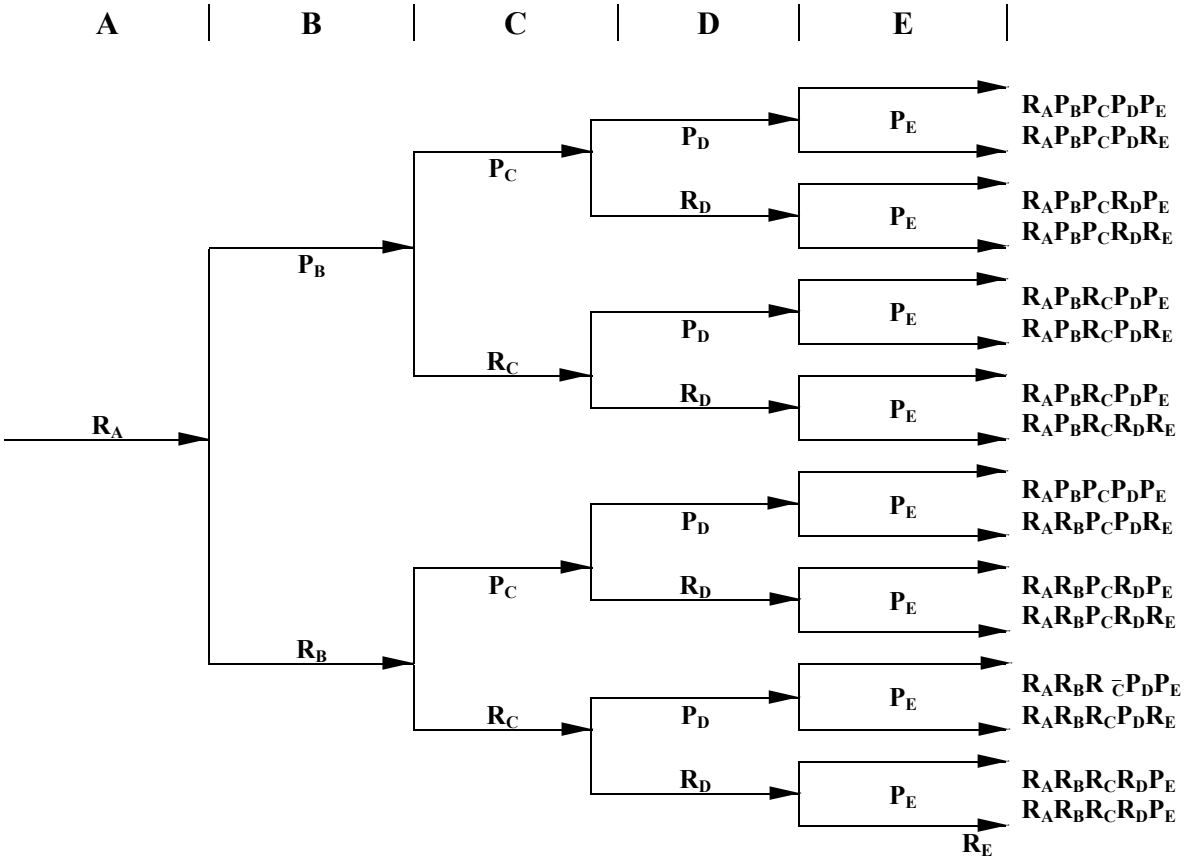


Рис. 1а

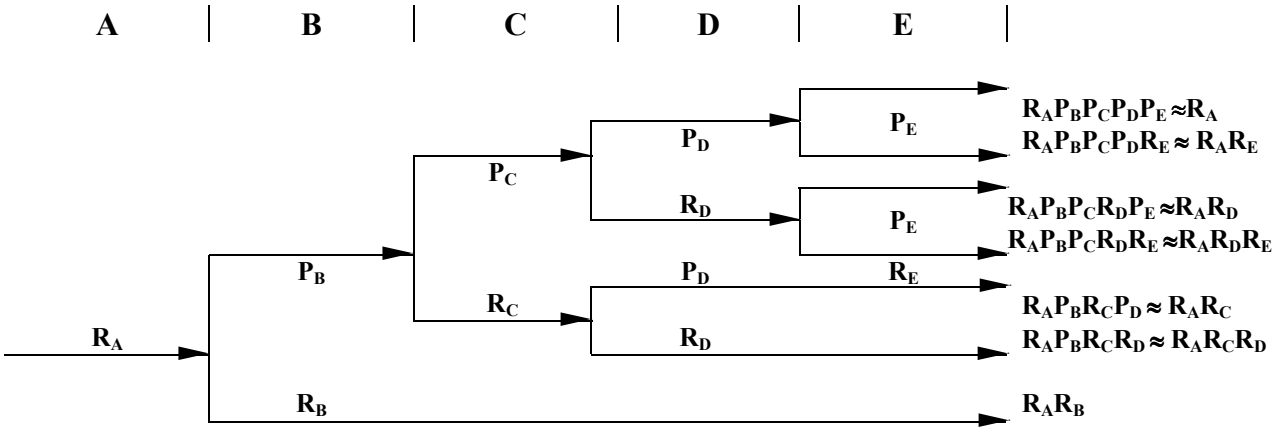
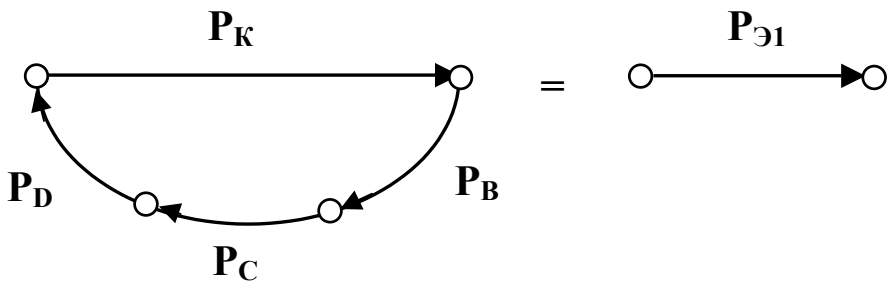


Рис. 1б

Рис.1 Дерево событий для крупной аварии с потерей теплоносителя:

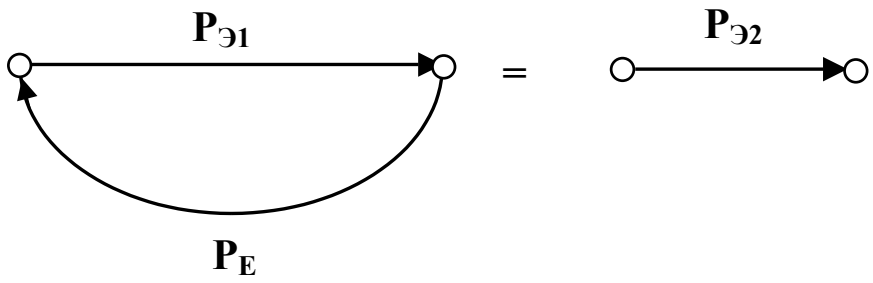
Рис.1а – полный вариант; рис.1б – упрощенный вариант **(R = 1-P)**



$$P_{Э1} = P_K / (1 - P_B P_C P_D R_K), \qquad R_K = 1 - P_K$$

Рис. 2а

$$P_{Э1} >> P_K \text{ при } P_B P_C P_D >> P_K$$



$$P_{Э2} = P_{Э1} / (1 - P_E R_{Э1}), \qquad R_{Э1} = 1 - P_{Э1}$$

Рис. 2б

$$P_{Э2} >> P_{Э1} \text{ при } P_E >> P_{Э1}$$

Рис. 2. Структурный информационный граф первого (рис.2а) и второго (рис.2б) эшелонов защиты