

**О.М. Ковалевич**

**ИЗБРАННЫЕ  
НАУЧНЫЕ ТРУДЫ**

**2008-2010**

**Москва 2011**

**УДК 621.039**

**К 32**

**Ковалевич О.М. Избранные научные труды (2008-2010) – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2011**

Настоящий сборник содержит опубликованные труды автора в 2008-2010 гг. Является продолжением сборника «Избранные научные труды («005-2007»).

Рассчитан на специалистов, работающих в области атомной энергии. Издается в авторской редакции.

© О.М. Ковалевич

© Оформление ФБУ «НТЦ ЯРБ»

# СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

*Атомная энергия, том 104. вып. 2  
Февраль 2008*

## **1. Введение**

Вероятностный анализ безопасности или оценка риска от атомных станций (АС) впервые был проведен в США Расмуссеном в 1975 г. [1]. В дальнейшем такие исследования стали необходимым условием анализа безопасности АС в европейских странах. Соответствующая методология интенсивно развивалась в сторону оценки надежности сложных систем безопасности, изучению процессов протекания тяжелых аварий, создания удовлетворительно банка данных по надежности элементов и систем АС, роли человеческого фактора в оценке вероятности возникновения и протекания аварийных ситуаций.

В СССР, а затем в Российской Федерации, вероятностный анализ безопасности АС начал развиваться в 80-х годах прошлого столетия и в 90-х годах стал уже необходимым условием разработки проектов новых блоков АС и элементом оценки уровня безопасности действующих блоков. В «общих положениях обеспечения безопасности атомных станций при проектировании, сооружении и эксплуатации» (ОПБ-83) [2] были введены вероятностные критерии для вновь сооружаемых блоков АС: вероятность в единицу времени (частота)

расплавления активной зоны не должна превышать  $10^{-5}$  год<sup>-1</sup>, вероятность (частота) тяжелых аварий с выходом больших количеств радиоактивности не должна превышать  $10^{-7}$  год<sup>-1</sup>. В течение 90-х годов по мере расширения системы правил и норм в области использования атомной энергии требования на проведение вероятностного анализа безопасности (ВАБ) распространилось практически на все объекты использования атомной энергии, такие как исследовательские реакторы, предприятия ядерного топливного цикла, судовые ядерные энергетические установки и др.

Оставим без комментариев, почему у нас используемые численные значения критериев ВАБ на порядок ниже, чем в западных странах. Также не будем касаться научного обоснования используемых по всему спектру задач методик вероятностного анализа. С самого начала использования ВАБ у специалистов и регулирующего органа возникало два вопроса. Первый – какова точность получаемых в рамках ВАБ результатов и насколько таким результатам можно доверять? Второй вопрос – а что делать с получаемыми результатами, как к ним относиться, если они больше или меньше предписанных значений критериев?

Следует напомнить, какую цель преследовал Расмуссен, поводя свое исследование [1]. Ставилась задача доказать, что риск для повреждения здоровья или смерти человека от аварий на АС существенно меньше риска от всех других угроз, техногенных и природных, подстерегающих живущего в районе АС индивидуума. Хотя удалось показать, что риск для человека от АС существенно меньше, чем от других причин, т.е.  $R_{АС} \ll R_{др}$  ( $10^{-7}-10^{-6} \ll 10^{-3}-10^{-4}$ ), коренного изменения в отношении общественного мнения к АС не произошло. И такая ситуация сложилась в США и в большинстве стран Европы на рубеже XX и XXI века. Одной из причин такой ситуации являются большие неопределенности, закладываемые в анализ, в силу недостаточности исходной информации и умения все корректно моделировать. Вторая причина – это чисто психологический момент, когда большинство людей не может представить, что значат маленькие вероятности ( $10^{-7}-10^{-6}$  в год), если на их памяти авария на АС ТМІ и чернобыльская авария и другие негативные моменты использования атомной энергии.

Развитие мирного использования атомной энергии (АС) всегда происходило между двух противоборствующих взглядов – потенциальной опасности использования АЭ (для нынешнего и будущего по-

коления) и ограниченности углеводородных ресурсов и экологических воздействий от их сжигания (глобальное потепление). Сторонники развития АЭ, анализируя прогнозы энергетических ресурсов, оперировали существенно большими ресурсами и практическим отсутствием воздействия на экологию при нормальной эксплуатации АС. Противники развития АЭ напирают на потенциальную опасность АС и связанных с их функционированием предприятий ядерного топливного цикла, особенно выделяя проблему обращения и захоронения радиоактивных отходов. В последние десятилетия в этом направлении добавились угрозы со стороны террористов, способных овладеть ядерными и радиоактивными материалами.

Специалисты ВАБ АС, понимая неопределенность получаемых вероятностных показателей безопасности АС или какого-либо другого объекта использования атомной энергии, предостерегают от фетишизации получаемых абсолютных значений риска, а ратуют за относительное сравнение получаемых результатов при рассмотрении разных проектов или при разработке путей модернизации действующих блоков. Определенное основание для такого подхода, но нет уверенности, что он не всегда даст правильное направление. В случае наличия одинакового преобладающего фактора в сравниваемых вариантах незначительные рассматриваемые дифференциальные факторы на фоне всех погрешностей не смогут гарантировать правильный вектор направления усилий. Похоже, что основательных анализов на этот счет не приводилось.

Вернемся к вопросу, что дает представляемые эксплуатирующей организацией значения требуемых вероятностей повреждения активной зоны и выброс больших величин радиоактивных продуктов за пределы АС и почему это требуется. Автору пришлось участвовать в назначении и величине этих параметров при разработке в ОПБ-83. Инициатива и настойчивость принятия таких параметров исходила от Минздрава СССР, который в те времена считал себя главным ответственным за безопасность АС. Каково понимание значений этих параметров сейчас в свете накопленного опыта использования ВАБ?

Сейчас ни у кого не вызывает сомнения, что основой обеспечения безопасности АС является детерминистский подход, основанный на требованиях многочисленных нормативных документов, где требования о проведении ВАБ является одним из таковых. Ссылаться на малую вероятность тяжелых аварий (малую величину индивидуального риска), как это делал Расмуссен, сейчас не модно. Многочислен-

ные школы ВАБ в заданных странах и сформировавшиеся за последние 10-20 лет в России в институтах, проектных организациях и на АС в основном занимаются уточнением методологии и расширением числа и типа исследуемых объектов без постановки вопроса о том, как эти результаты можно использовать эффективным способом. Сейчас во главе угла стоит задача продемонстрировать наличие требуемых результатов и преодоление разногласий в используемой методологии среди различных школ и представителей органов надзора. При формальном подходе к анализу ВАБ и отсутствием эффективного влияния получаемых результатов на конкретные технические характеристики объекта проблема сводится в основном к выяснению отношений между узкой группой специалистов и желанием руководства продемонстрировать хорошие вероятностные показатели безопасности на интересующих их объекте. Необходимо внедрение вероятностного анализа безопасности в комплексные анализы с привлечением экономических методов.

## **2. Предлагаемые комплексные анализы**

Проведенные и опубликованные автором за последние годы работы [2-3] позволяют сформулировать рассматриваемые ниже комплексные задачи с привлечением результатов вероятностного анализа. Следует сразу оговориться, что для использования ВАБ в предлагаемых комплексных анализах необходима информация, для получения которой у нас не проводятся необходимые исследования или ее достаточно трудно извлечь из получаемых данных. Речь в первую очередь идет об априорной зависимости (т.е. на стадии проектирования и сооружения объекта) между ожидаемым ущербом (в рублях) и вероятностью его реализации. Под вероятностью следует понимать вероятность за время жизни объекта, а не частоту (вероятность в единицу времени), как это обычно используется в ВАБе. Для получения такой зависимости необходимо: проводить как минимум ВАБ уровня III, а не уровня I, как это зачастую делается. Кроме того, необходимы большие усилия (экономические, финансовые и, в какой-то степени, политические) для перевода натуральных последствий аварий (загрязнения территорий, разрушения, повреждения здоровью людей и др.) в финансовые показатели. Другой необходимый блок информации – это влияние вложенных средств на сооружение объекта (капитальных и текущих затрат) на показатели безопасности, т.е. на вероятности и последствия аварии, что также является весьма трудоемкой задачей.

Предлагается рассмотреть постановку трех следующих комплексных задач:

- 1) Анализ оптимальных затрат на обеспечение безопасности.
- 2) Определение показателей для страхования и компенсации ущерба.
- 3) Оптимальное приведение в безопасное состояние выведенных из эксплуатации потенциально опасных объектов использования атомной энергии.

Все предлагаемые задачи основываются на вероятностных показателях объекта.

### **3. Анализ оптимальных затрат на обеспечение безопасности**

Подробно постановка задачи и пути ее решения изложены в [3, 4]. Здесь мы ограничимся кратким изложением.

Пусть для рассматриваемого объекта постулировано ряд ( $i=1, 2, 3, \dots, m$ ) чрезвычайных (не штатных) ситуаций ( $ЧС$ ), т.е. аварий, в результате которой возможно нанесение ущерба персоналу, населению, окружающей среде. Каждому  $ЧС_i$  соответствует множество определенных последствий  $\{П_i\}$ , формирующих ущерб и соответствующих каждому значению последствий множество вероятностей  $\{P_i\}$  или частот  $\{W_i\}$ . Затраты на снижение риска от каждого  $ЧС$  представляется целесообразным разделить на три группы:

априорные затраты  $З_1$  на предотвращение  $ЧС$ , т.е. на снижение вероятности их реализации;

априорные затраты  $З_2$  на принятие мер по ограничению последствий  $ЧС$ ;

апостериорные затраты  $З_3$  (когда  $ЧС$  уже реализовалось) на ослабление и ликвидацию последствий, а также на компенсацию ущерба от последствий  $ЧС$ .

Пусть имеется постулированный набор угроз ( $ЧС$ ) ( $i = 1, 2, 3 \dots m$ ), которые подпадают под рассмотрение.

Каждое рассматриваемое  $ЧС$  обладает спектром (множеством) определенных последствий  $\{П_i\}$  и соответствующих каждому значению последствий множеством частот их реализации  $\{W_i\}$  или вероятностей  $\{P_i\}$ .

Затраты на  $ЧС$  различны по направленности и по времени и связаны с разными ведомствами, организациями, специалистами. Представляется целесообразным выделить три качественные группы таких затрат:

априорные затраты  $Z_1$  на предотвращение ЧС, т.е. на снижение вероятности их реализации;

априорные затраты  $Z_2$  на принятие мер по ограничению последствий от возможных ЧС;

апостериорные затраты  $Z_3$  (когда ЧС уже реализовалось) на ослабление и ликвидацию последствий, а также на компенсацию ущерба от последствий ЧС.

Отметим важность подобной дифференциации, поскольку каждая группа затрат в большинстве случаев есть ответственность разных организаций и специалистов.

Поясним указанные три группы затрат на примере атомных электростанций. Затраты  $Z_1$  соответствуют затратам на изучение путей предотвращения катастрофического разрушения оборудования, на контроль за качеством его изготовления, монтажа, обслуживания и ремонта во время эксплуатации и т.п. Затраты  $Z_2$  связаны с организацией аварийного охлаждения, созданием локализирующих систем и т.п., а затраты  $Z_3$  – с введением плана по защите населения на случай тяжелых аварий, с реабилитацией зараженных территорий, компенсацией причиненного ущерба.

Необходимо отметить принципиальную разницу между априорными затратами  $Z_1$  и  $Z_2$  и апостериорными затратами  $Z_3$ .

Затраты  $Z_1$  и  $Z_2$  соответствуют начальному моменту времени  $t = 0$ , когда необходимо учитывать угрозы потенциального ЧС<sup>1</sup>. Затраты  $Z_3$  востребуются к моменту  $T_{ЧС}$ , когда произойдет ЧС, реализация же ЧС имеет вероятностный характер (оно может произойти когда угодно или может вообще не произойти за рассматриваемый период), что необходимо учитывать в вероятностном и временном аспектах. Кроме того, в осуществление затрат  $Z_3$  может включаться система страхования со страховщиком, страховыми компаниями, государством. Об этом мы скажем ниже.

Задача оптимизации затрат сводится к поиску минимальных значений при определенных условиях функции  $Z$ .

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3, \quad (1)$$

Предметом рассмотрения могут быть  $i = 1, 2, 3 \dots m$  событий. В первую очередь рассмотрим задачу для одного ЧС.

Рассмотрим сначала случай одного ЧС.

---

<sup>1</sup> Мы сейчас не учитываем осуществление затрат  $Z_1$  и  $Z_2$  в течение определенного времени.



Перепишем выражение (1) в соответствии с постановкой задачи в виде:

$$Z(W; P^a) = Z_1(W) + Z_2(P^a) + Z_3(P^{an}), \quad (2)$$

где  $Z_1(W)$  – затраты на уменьшение частоты  $W$  события;  $Z_2(P^a)$  – затраты на уменьшение априорных актуарных (страховых) последствий  $P^a$ ;  $Z_3(P^{an})$  – затраты на ликвидацию апостериорных последствий  $P^{an}$ .

Все затраты в конечном счете будем вычислять в денежном исчислении, т.е. в рублях. Последствия  $P^a$  и  $P^{an}$  первоначально будем измерять в натуральных единицах (число человеческих жертв, ущерб здоровью, площади зараженных территорий, экологическое воздействие, число разрушенных зданий и т.п.). Введем для этого обобщенную единицу измерения НЕП – натуральную единицу последствий. Для каждой НЕП имеется свой эквивалент в рублях.

Объем апостериорных (фактических) последствий  $P^{an}$  может не совпадать с объемом априорных последствий  $P^a$ , полученных в расчете, из-за неточностей прогноза (расчета). Из-за этого вводится коэффициент  $\psi$  соотношения между этими величинами, т.е.

$$P^{an} = \psi P^a \quad (3)$$

Поскольку затраты  $Z_3$  имеют вероятностный характер, возникает вопрос как их учитывать в уравнении (2). В соответствии с КТВ можно оперировать средними ожидаемыми последствиями, т.е. для объектов с конечным временем жизни  $T_{жс}$  апостериорные последствия:

$$P^{an} = P^a \cdot W \cdot T_{жс} = \psi \cdot P^a \cdot W \cdot T_{жс} \quad (4)$$

С учетом одновременности проведения затрат  $Z_1 + Z_2$  и  $Z_3$  необходимо привести их к одному моменту времени  $t=0$  (считаем, что  $Z_1$  и  $Z_2$  производятся одновременно при  $t=0$ ) путем известной процедуры дисконтирования, т.е. умножением  $Z_3$  на  $e^{-rT_{жс}}$ , где  $r$  – коэффициент дисконтирования, год<sup>-1</sup>,  $T_{жс}$  – время реализации ЧС, годы.

Что принимать за  $T_{жс}$  – одна из проблем, поскольку ЧС в принципе может реализоваться в любой точке интервала  $[0; T_{жс}]$ ; вместе с тем это одна из проблем системы страхования. Принимаем за  $T_{жс}$  среднее ожидаемое его значение, т.е.

$$T_{жс} = \frac{\int_0^{T_{жс}} t W dt}{\int_0^{T_{жс}} W dt} = \frac{\frac{1}{2} W T_{жс}^2}{W T_{жс}} = \frac{1}{2} T_{жс} \quad (5)$$

В результате получим

$$Z_3 = C \cdot \psi \cdot \Pi^a \cdot W \cdot T_{жс} \cdot e^{-\frac{1}{2}rT_{жс}} \quad (6)$$

где  $C$  – переводной коэффициент НЕП в рубли; (руб/НЕП);  $r$  – коэффициент дисконтирования.

Таким образом, полные затраты  $Z$  будут следующей функцией двух переменных:

$$Z(W; \Pi^a) = Z_1(W) + Z_2(\Pi^a) + D \cdot W \cdot \Pi^a \quad (7)$$

где

$$D = C \cdot \psi \cdot T_{жс} \cdot e^{-\frac{1}{2}rT_{жс}} \quad (8)$$

Оптимизация затрат теперь сводится к поиску значений  $W_0$  и  $\Pi_0^a$ , когда функция  $Z(W_0; \Pi_0^a)$  будет иметь минимум  $Z^{\min}$ .

Предполагается, что функции  $Z_1(W)$  и  $Z_2(\Pi^a)$  известны из условий проектирования, сооружения и эксплуатации объекта. Но определение этих функций в настоящий момент – наиболее сложная проблема, для решения которой необходимы большие усилия.

Найти минимальное значение функции  $Z(W; \Pi^a)$  при известных функциях  $Z_1(W)$  и  $Z_2(\Pi^a)$  с помощью современных вычислительных средств нетрудно. В отдельных случаях задача решается аналитически, когда искомые значения  $W_0$ ,  $\Pi_0^a$  и  $Z^{\min}$  вычисляются с помощью простых алгебраических выражений.

Зависимость  $Z_1(W)$  и  $Z_2(\Pi^a)$  качественно могут быть представлены, как это показано на рис. 1. Чем больше затраты  $Z_1$  и  $Z_2$ , тем меньше вероятность  $W$  и последствия  $\Pi^a$  рассматриваемого ЧС.

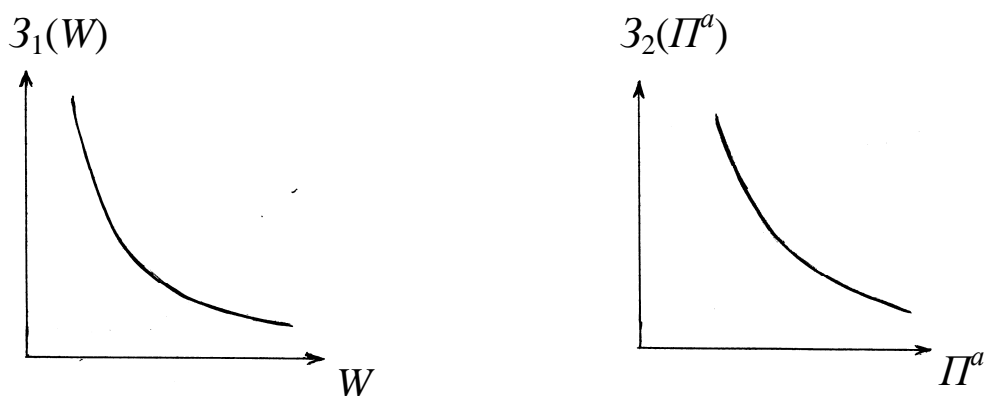


Рис. 1. Качественные зависимости затрат  $Z_1$  и  $Z_2$  от вероятности  $W$  и последствий  $\Pi^a$

Указанные качественные зависимости можно аппроксимировать следующими аналитическими функциями:

$$z_1(W) = \frac{A}{W}; \quad z_2(\Pi^a) = \frac{B}{\Pi^a} \quad (9)$$

где коэффициенты  $A$  и  $B$  находятся из расчета для конкретных объектов ( $A$ , руб/год;  $B$ , руб · НЕП).

В этом случае суммарные полные затраты можно представить в виде следующей функции двух переменных:

$$z(W; \Pi^a) = \frac{A}{W} + \frac{B}{\Pi^a} + D \cdot W \cdot \Pi^a \quad (10)$$

Для функции двух переменных при определенных условиях можно получить значения переменных  $W_0$  и  $\Pi_0^a$  в виде простых алгебраических выражений, при которых функция  $z$  имеет минимальное значение (см. приложение 1), а именно:

$$W_0 = \left( \frac{A^2}{DB} \right)^{1/3} \quad \Pi_0^a = \left( \frac{B^2}{AD} \right)^{1/3} \quad (11)$$

Тогда

$$z^{\min} = (ABD)^{1/3} + (ABD)^{1/3} + (ABD)^{1/3} = 3 \cdot (ABD)^{1/3} \quad (12)$$

Получился довольно интересный результат: все три составляющие равны.

В [...] рассмотрена задача для одного ЧС с несколькими видами последствий  $\Pi_j^a$ , где  $j=1, 2, 3 \dots l$ . Суммарные затраты в этом случае определяются выражением

$$z[W; \tilde{z}_2; \Pi_j^a(z_2^i)] = z_1(W) + \sum_{j=1}^l z_2^i(\Pi_j^a) + \tilde{z}_2 + \\ + W \cdot T_{\text{жс}} \cdot e^{-\frac{1}{2}T_{\text{жс}}} \cdot \sum_{j=1}^l C_j \psi_j(\Pi_j^a - \Delta \Pi_j^a) \quad (13)$$

Аналитическое определение минимальных общих затрат  $z^{\min}$  в данном случае также затруднено, для этого необходимо численное решение.

Также в [...] рассмотрена задача определения минимальных затрат при нескольких возможных ЧС.

Общие затраты будут представлять собой сумму затрат по каждому  $i$ -му ЧС из возможных  $m$  событий и будут состоять также из трех составляющих:

$$z = \sum_{i=1}^m z_i = \sum_{i=1}^m z_1^i + \sum_{i=1}^m z_2^i + \sum_{i=1}^m z_3^i \quad (14)$$

Запишем в общем виде средние ожидаемые эффективные затраты:

$$Z(W_i; \Pi_j^a) = \sum_{i=1}^m Z_1^i(W_i) + \sum_{ij}^{m;l} Z_2^{ij}(\Pi_{ij}^a) + \sum_{ij}^{m;l} W_i \cdot T_{жс}^i \cdot \Pi_{ij}^a \cdot \psi_{ij} \cdot C_{ij} \cdot e^{-\frac{1}{2}rT_{жс}^i} \quad (15)$$

При записи (16) мы подразумевали, что каждое  $ЧС_i$  имеет свои зависимости  $Z_1^i(W_i)$ ,  $Z_2^i(\Pi_{ij}^a)$  и виды последствий  $j$ , свои неточности в вычислении последствий  $\psi_{ij}$  и свои коэффициенты  $C_{ij}$  перевода последствий  $\Pi_{ij}^a$  в рубли.

В первом приближении суммарные минимальные затраты можно оценить как сумму минимальных затрат каждого  $ЧС_i$ , т.е.

$$Z^{\min} = \sum_{i=1}^m Z_i^{\min} \quad (16)$$

Но возможно, что истинное минимальное значение затрат от всех  $ЧС$  не будет суммой минимальных значений от каждого  $ЧС$ , т.к. более эффективным может быть перераспределение затрат на управление риском между разными  $ЧС$ . В этом случае требуется решение более сложной задачи с помощью вычислительных машин.

Аппроксимация функций  $Z_1(W)$  и  $Z_2(\Pi^a)$  в виде (5-10) характеризуется очень сильной (обратно пропорциональной) зависимостью затрат от  $W$  и  $\Pi^a$ , что может не соответствовать реальной ситуации. Более реальны ситуации, когда зависимости затрат  $Z_1$  и  $Z_2$  могут быть представлены в виде:

$$Z_1(W) = \frac{A}{W^n}; \quad Z_2(\Pi^a) = \frac{B}{(\Pi^a)^m} \quad (17)$$

где  $1 > n > 0$  и  $1 > m > 0$ , т.е. более слабыми зависимостями от аргументов  $W$  и  $\Pi^a$ , чем в (5-10). (В принципе описанное ниже представление функций  $Z_1(W)$  и  $Z_2(\Pi^a)$  годится и для случая  $n > 1$  и  $m > 1$ ).

Тогда для функции  $Z_1(W; \Pi^a)$  можно написать уравнение:

$$Z_1(W; \Pi^a) = \frac{A}{W^n} + \frac{B}{(\Pi^a)^m} + D \cdot W \cdot \Pi^a \quad (19)$$

Как показывает проведенный анализ, функция  $Z_1(W; \Pi^a)$  имеет минимум только при определенных условиях, причем эти условия не зависят от постоянных  $A_n$ ,  $B_m$  и  $D$ , а определяются только значениями  $n$  и  $m$ . Существует некоторая область комбинации значений  $n$  и  $m$ , где функция полных затрат  $Z$  имеет минимум. Вне этой области комбинаций значений  $n$  и  $m$  функция  $Z$  вообще не имеет экстремума.

#### 4. Определение показателей для страхования и компенсации ущерба

В работе [2] рассмотрены возможные модели системы страхования и компенсации ущерба.

Одним из эффективных способов управления риском от потенциально опасных объектов (производств) является возложение ответственности за возможный ущерб физическим и юридическим лицам на эти объекты независимо от их статуса (государственный или частный). Это зафиксировано в законодательном порядке в России [25] и на международном уровне [26]. Провозглашение ответственности за возможный ущерб еще не означает, что потенциально опасный объект будет способен реально финансово обеспечить компенсацию причиненного ущерба в случае реализации такой ситуации. Необходимо иметь механизм для обеспечения готовности потенциально опасного объекта компенсировать возможный ущерб. Таким механизмом служит механизм страхования на различных уровнях, который в общем виде также закреплен в законодательном порядке. Сам факт нанесения ущерба и его размеры носят вероятностный характер. В силу этого финансовые потоки и взаимодействия участвующих сторон не столь очевидны и есть необходимость выработки и фиксации общих подходов.

Все рассмотренные в [2] модели страхования так или иначе исходят из суммы страхования, т.е. величины компенсируемого ущерба пострадавшим (третьим лицам). Величина возможного ущерба и момент за время жизни объекта когда произойдет страховой случай есть характеристики вероятностные, т.е. требуется соответствующий анализ. Поскольку любой вероятностный анализ может дать желаемую величину только в определенных интервалах с определенной вероятностью, то также требуются определенные волевые и нормативные решения.

##### **5. Оптимальное приведение в безопасное состояние выведенных из эксплуатации потенциально опасных объектов с учетом риска**

Современная ситуация в стране характеризуется наличием большого количества отслуживших свой срок объектов ядерно-промышленного комплекса, которые продолжают оставаться потенциально опасными. Выведенные и выводимые в будущем АС оказываются в этом числе. Такое положение характерно и для других отраслей промышленности, сюда относятся объекты, эксплуатация которых прекращена из-за аварий, а также территории, подвергшиеся загрязнению в результате аварий. Вопрос о приведении таких объек-

тов в безопасное состояние связан с наличием необходимых финансовых средств, которых естественно не хватает для полного и быстрого охвата всех объектов. Такие объекты различаются по потенциальной опасности и по величине необходимых финансовых средств на их приведение в безопасное состояние. Одни из них требуют безотлагательного вмешательства, другие позволяют существовать длительное время с приемлемым использованием защитных и локализирующих мероприятий. В условиях ограниченности средств требует решение задачи об очередности приведения таких объектов в безопасное состояние с учетом минимизации риска при нахождении их в опасном состоянии.

В работе [6] было предложено решение такой задачи путем оптимизации эффективных затрат на доведение до безопасного состояния и затрат на компенсацию возможного ущерба за время доведения до безопасного состояния.

Опасность объекта после прекращения эксплуатации определяется неким эффективным показателем  $Q_0$  (количество радиоактивных или вредных химических веществ, взрывчатых и пожароопасных веществ и т.п.), а также вероятностью в единицу времени (частотой)  $W_0$  чрезвычайного события (ЧС), способного нанести ущерб населению и окружающей среде при воздействии за пределы объекта определенной части показателя  $Q_0$ .

Доведение объекта до безопасного состояния может производиться двумя путями:

- 1) уменьшение величины  $Q_0$  до допустимой величины  $Q_{дон}$  (за счет удаления с объекта либо принудительной или естественной трансформации).
- 2) уменьшение вероятности  $W_0$  чрезвычайных событий с населением ущерба населению и окружающей среде до допустимой величины  $W_{дон}$  (за счет дополнительных защитных и локализирующих систем, охраны объекта, плана мероприятий по защите населения и т.п.).

Предполагается, что известны зависимости показателя  $Q(Z_Q)$  от затраты  $Z_Q$  на его уменьшение и показателя  $W(Z_W)$  от затрат  $Z_W$  на его уменьшение. Причем  $Q_{дон}$  и  $W_{дон}$  достигаются при соответствующих затратах  $Z_Q^{дон}$  и  $Z_W^{дон}$ .

Считается, что объект во время  $T_0$  доведения его до безопасного состояния также является потенциально опасным и может нанести ущерб населению и окружающей среде. Чем меньше будут ежегодные затраты  $z$  на доведение объекта до безопасного состояния, чем больше времени объект будет находиться в опасном состоянии и тем больше возможное среднеожидаемое значение ущерба за этот период.

Эффективными затратами на приведение объекта в безопасное состояние предлагается считать, кроме непосредственных затрат  $Z_Q$  и  $Z_W$ , также затраты  $Z_Y$  на компенсацию возможного ущерба в случае ЧС на объекте на интервале времени  $[0; T_0]$  приведения его в безопасное состояние.

При заданных ежегодных суммарных затратах  $z$  рассматриваются разные доли финансирования затрат на уменьшение показателя  $Q$  и показателя  $W$ , т.е. на суммарные затраты  $Z_Q$  и  $Z_W$ . В силу разных зависимостей  $Q(Z_a)$  и  $W(Z_w)$  величина затрат на компенсацию возможного ущерба может иметь различный характер зависимости от доли затрат  $\gamma$  на уменьшение  $Q$  и  $W$  (монотонный или оптимальный). Ежегодное финансирование  $z$ , величина ущерба в финансовом выражении на единицу последствий ЧС в натуральных показателях, а также вид функций  $Q(Z_a)$  и  $W(Z_w)$  определяют соотношение между непосредственными затратами на приведение объекта в безопасное состояние  $Z_{QW}$  и затратами  $Z_Y$ . Последние могут как незначительно отличаться от  $Z_{QW}$ , так и существенно превосходить их.

Выражения для полных эффективных затрат  $Z^{\phi}$  не были проанализированы относительно влияния на конечный результат отдельных параметров. Такому анализу посвящены нижеследующие разделы.

Полученное в [1] выражение для полных эффективных затрат для доведения одного потенциально опасного объекта до безопасного состояния с учетом затрат на компенсацию возможного ущерба есть:

$$Z^{\phi} = z \cdot T_0 + \alpha \cdot \beta \cdot \int_0^{T_0} Q(t) \cdot W(t) dt \quad (1)$$

где:

$z$  – ежегодные затраты на приведение объекта в безопасное состояние (начиная с момента  $t = 0$ );

$T_0$  – время приведения объекта в безопасное состояние;

$Q(t)$  – изменение во времени количественного показателя опасности объекта (количество опасных веществ);  
 $W(t)$  – изменение во времени вероятности ЧС на объекте в единицу времени ( $\text{год}^{-1}$ );  
 $\alpha$  – доля выхода (от 0 до 1) с объекта определяющих ущерб опасных веществ при ЧС;  
 $\beta$  – перевод в рубли нанесенного ущерба на единицу вышедших опасных веществ  $\left( \text{например, } \frac{\text{руб}}{\text{кюри}}; \frac{\text{руб}}{\text{кг}} \text{ и т.п.} \right)$ .

Затраты на приведение объекта в безопасное состояние:

$$\begin{aligned}
 Z_{QW}(t) &= z \cdot t \\
 Z_Q(t) &= (1 - \gamma) \cdot Z_{QW}(t) \\
 Z_W(t) &= \gamma \cdot Z_{QW}(t) \\
 Z_{QW}(t) &= Z_Q(t) + Z_W(t)
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $(1 - \gamma)$  и  $(\gamma)$  доли полных затрат соответственно для  $Z_Q$  и  $Z_W$ .

Время  $T_0$  доведения объекта до безопасного состояния по одному из двух критериев безопасного состояния  $Z_Q^{\text{don}}$  или  $Z_W^{\text{don}}$ , когда соответственно  $Q(t) = Q_{\text{don}}$  или  $W(t) = W_{\text{don}}$ , составит:

$$T_0 = \min \left\{ \frac{Z_Q^{\text{don}}}{z(1 - \gamma)}; \frac{Z_W^{\text{don}}}{z \cdot \gamma} \right\} \tag{3}$$

Поиск оптимального пути достижения безопасного состояния объекта с точки зрения минимальных значений  $Z^{\text{эф}}$  при заданных ежегодных объемах финансирования сводится к нахождению оптимальной доли распределения средств между  $Z_Q$  и  $Z_W$ .

Примем, что функции  $Q(Z_Q)$  и  $W(Z_W)$  заданы аналитическими выражениями:

$$Q(Z_Q) = Q_0 e^{-\frac{Z_Q}{\tau_Q}}; \quad W(Z_W) = W_0 e^{-\frac{Z_W}{\tau_W}} \tag{4}$$

где характерные величины  $\tau_Q$  и  $\tau_W$  чувствительности  $Q$  и  $W$  к произведенным затратам есть:

$$\tau_Q = \frac{Z_Q^{\text{don}}}{\ln \frac{Q_0}{Q_{\text{don}}}}; \quad \tau_W = \frac{Z_W^{\text{don}}}{\ln \frac{W_0}{W_{\text{don}}}} \tag{5}$$

После преобразований вместо (1) с учетом (4) и (5) имеем:

$$Z^{\text{эф}}(T_0) = z \cdot T_0 + \alpha \cdot \beta \cdot Q_0 \cdot W_0 \int_0^{T_0} e^{-\lambda t} dt \tag{6}$$



где 
$$A = \frac{z(1-\gamma)}{\tau_Q} + \frac{z \cdot \gamma}{\tau_W} \quad (7)$$

Преобразуем полученные выше выражения в виде, удобном для численного анализа.

Примем, что

$$Z_Q^{\text{дон}} = \kappa \cdot Z_W^{\text{дон}}; \quad \kappa > 1 \quad (8)$$

т.е. что затраты на доведение объекта до безопасного состояния за счет уменьшения вероятности ЧС в  $\kappa$  раз меньше, чем за счет уменьшения показателя безопасности  $Q$ .

Также обозначим, что соотношение между параметрами  $\ln \frac{Q_0}{Q_{\text{дон}}}$  и  $\ln \frac{W_0}{W_{\text{дон}}}$  в (5) связаны параметром  $n$ .

$$B_Q = n \cdot B_W; \quad B_Q \equiv \ln \frac{Q_0}{Q_{\text{дон}}}; \quad B_W \equiv \ln \frac{W_0}{W_{\text{дон}}} \quad (9)$$

где  $n$  – любое положительное число.

С учетом сказанного суммарные затраты к моменту  $t=0$  с учетом выше рассмотренного составят:

$$Z_{\text{выд}}(t=0) = z_{\text{выд}} \cdot T_{\text{выд}} + \alpha \cdot \beta \cdot Q_0 \cdot W_0 \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot T_{\text{выд}}}) + \alpha \cdot \beta \cdot Q_0 \cdot E_0 \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot T_{\text{выд}}})$$

Полные затраты к моменту  $T_0$  составят

$$Z_{\text{пол}}^{\text{ф}}(T_0) = Z_{\text{выд}}(t=0) + Z^{\text{эф}}(T_0)$$

Приведенная методика оценки затрат на достижение потенциально опасных объектов до безопасного состояния с учетом возможного воздействия в этом процессе позволяет ориентироваться в путях достижения безопасного состояния оптимальным способом.

## 6. Заключение

Предлагаемые комплексные задачи с привлечением результатов вероятностного, экономического и финансового анализа позволяют искать решение в важной проблеме сочетания вопросов безопасности потенциально опасных объектов и располагаемыми средствами. Решение подобных задач требует проведения большого количества технической и экономической информации об объекте, анализ которой в настоящее время не проводится в силу отсутствия соответствующих нормативных требований, ограниченности и экономии средств. Но ожидаемые экономические эффекты для государства и отрасли от реализации таких анализов значительно превысят расходы на проведение таких исследований. Необходим начальный импульс.

### Литература

1. Расмуссен. Nuclear Safety Study. US Nuclear Regulatory Commission (USNRS). «Reactor Safety Study – An Assessment of Accident Risk in Commercial Nuclear Power Plant», WASH-1400 (Nuclear 75/014), 1975
2. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-АС)
3. Ковалевич О.М. Риск в техногенной сфере. Издательство МЭИ, 2006
4. Ковалевич О.М. Определение оптимальных затрат на обеспечение безопасности атомных станций. Вестник МЭИ, № 5, 2006
5. Ковалевич О.М. Оптимальное приведение в безопасное состояние выведенных из эксплуатации потенциально опасных объектов с учетом риска. Проблемы безопасности и чрезвычайные ситуации, № 6, 2006; № 2, 20

## ПОГРЕШНОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ПРИ ОБОСНОВАНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ<sup>2</sup>

*Атомная энергия, том 106, вып.2,  
февраль 2009*

**Введение.** Планируемый новый этап интенсивного развития ядерной энергетики (ЯЭ) в России неразрывно связан с адекватным обоснованием безопасности атомных станций (АС) и функционирования всех предприятий ядерного топливного цикла (ПЯТЦ). Признанием достаточности подтверждения безопасности этих объектов является одобренные регулирующим органом обосновывающие материалы при сооружении, эксплуатации и выводе из эксплуатации.

Представляемые в регулирующий орган показатели безопасности в значительной степени основываются на результатах расчётов развиваемых программных средствах (ПС) и соответствующей вычислительной техники. Закладываемые в ПС методики расчёта состояния объекта и анализируемых процессов основываются на теоретических разработках и имеющихся экспериментальных данных. Известно, что как экспериментальные, так и расчётные данные не могут обеспечить абсолютной точности результатов и всегда имеют определённые погрешности и неопределённости (ПИН), учитывать кото-

---

<sup>2</sup> Статья написана в соавторстве с А.А. Строгановым

рые необходимо при признании обоснованности показателей безопасности.

В 60-70-х годах трудами Л.Н. Усачёва, В.В. Орлова [1,2,3] на основе теории возмущений при расчётах характеристик ядерного реактора (критичность, защита от излучений, коэффициент воспроизводства и др.) была разработана методология определения погрешностей таких характеристик. Источником погрешностей в первую очередь видели недостаточную экспериментальную информацию о взаимодействии нейтронов и излучений с ядрами используемых в атомной промышленности веществ. При этом была также решена обратная задача, - какова должна быть точность экспериментальных ядерных данных, чтобы иметь необходимую точность расчётных физических характеристик реактора.

В дальнейшем развитие ЯЭ выдвинуло необходимость иметь представление о ПИН в других областях, связанных с расчётом теплофизических процессов, прочностью элементов конструкций, переносом радиоактивных веществ и излучений и др.[4,5].

Имеются причины остановиться в настоящее время на проблеме ПИН при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии. Это скудность и бессистемность приводимой в обосновывающих материалах информации о ПИН для АС, не говоря уже о ПЯТЦ. Примером может быть проведённый анализ проектных материалов и ТОБ 1-го блока 2- очереди ЛАЭС<sup>3</sup>, а также попытки добиться одинакового подхода к отражению проблемы ПИН в аттестуемых Ростехнадзором ПС. В последние годы появился ряд работ [7, 8, 9] с новым подходом к оценке ПИН на основе метода квантильных оценок с пессимистическим высказыванием относительно ранее используемых методов и полученных на их основе результатов для действующих и проектируемых блоков АЭС. Требования зарубежных заказчиков для сооружаемых нами АЭС также ставят эту проблему. Необходима согласованная система взглядов, основанная на взаимопонимании науки, проектных организаций и регулирующих органов в процессе их взаимодействия по данной проблеме.

Возникают следующие основные вопросы:

- как оценивать и какую информацию о ПИН приводить в обосновывающих материалах;

---

<sup>3</sup> Этот факт был отмечен в заключении Главгосэкспертизы РФ.

- какие нормативные требования имеются и необходимы на этот счёт;
- какие должны быть взаимоотношения между экспериментальными и расчётными данными при обосновании безопасности.

**Проблемные вопросы.** Рассмотрим основные проблемные вопросы, стоящие сейчас перед процедурой обоснования безопасности объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) с точки зрения ПИН.

В первую очередь необходимо определиться с используемыми терминами. Оперирование у нас и за рубежом таким набором терминов как ошибка, точность, погрешность, неопределённость и др. требует однозначной договорённости. Ситуация осложняется, что установившиеся ГОСТы по измерениям установили определённый подход к терминологии и требованиям к оформлению результатов измерений, к чему относятся и обработка результатов экспериментов. Для погрешностей и неопределённостей результатов расчёта, с одной стороны, имеются свои специфические моменты, с другой стороны, желательно не уходить далеко от сложившегося подхода и терминологии.

Теоретические модели анализа погрешностей и неопределённостей результатов расчета различны как по своему существу, так и по используемой терминологии при одной и той же или близкой модели. Исследователи ПИН сами определяют (или разрабатывают новую), какой пользоваться при анализе ПИН конкретного объекта или процесса. Вряд ли однозначно ассоциируется характер модели с названиями модели как детерминированная (детерминистическая), вероятностная, статистическая, стохастическая, модель чувствительности и др.

Источником ПИН являются погрешности в информации о различного вида свойствах используемых веществ, несовершенство расчётных методик, погрешности в адекватном отражении расчётной моделью реальных характеристик исследуемого объекта. Несоввершенство и необходимость улучшения расчётных методик есть принципиальная научная задача, требующая постоянного развития для каждого вида ОИАЭ. Необходимо внедрение понятий и разработка реперных (прецизионных, наилучшей оценки) кодов для всех ОИАЭ, которые в настоящее время развиты для АЭС в направлении нейтронно-физических и теплогидравлических задач. При наличии не-

скольких таких кодов должны проводиться исследования по сравнению полученных на их основе результатов.

Адекватное отражение в расчёте реальных характеристик объекта есть задача обеспечения качества при проведении расчётных исследований. В любом случае эти факторы должны быть затронуты при представлении расчётных показателей в обоснование безопасности.

Проблема достоверности используемых в расчетах в качестве входных данных различных свойств (не ядерных) применяемых веществ остаётся одной из центральных в общей проблеме ПИН получаемых результатов расчёта. Проводимая в стране работа по аттестации различных свойств используемых в атомной промышленности материалов [5] находится в начальной стадии и носит чисто информационный характер. Попытки связать эту деятельность с деятельностью по аттестации ПС не увенчались успехом. Важно, чтобы аттестуемые свойства веществ, кроме рекомендуемых точечных значений, содержали информацию о доверительных интервалах.

В ряду с данными о свойствах веществ стоит информация о замыкающих соотношениях, используемых в расчётных моделях и обычно рассматриваемая авторами расчётов как нечто абсолютно точное. Достоверность такой информации также должна быть оценена и отражена в анализе ПИН конечных результатов.

В проблему источников ПИН и их оценки должны быть включены возможные ошибки пользователя ПС и авторов расчётов. Эти вопросы ещё не находят достаточного внимания.

Широкое распространение получило для демонстрации точности расчётов сравнение результатов расчёта с результатами эксперимента, когда погрешность расчёта определяют как отношение разницы расчётного и экспериментального значений к расчётному или экспериментальному значению (в процентах). Данный подход далеко не очевиден. По мере усложнения систем и процессов адекватный эксперимент далеко не всегда возможен. Но даже если адекватный эксперимент возможен, необходимо иметь в виду, что как расчёт, так и эксперимент имеют свои ПИН и необходим соответствующий анализ, чтобы определить, где “хороший” эксперимент и “плохой” расчёт или “хороший” расчёт и “плохой” эксперимент и что с чем необходимо сравнивать. В представляемых обосновывающих материалах такой анализ зачастую отсутствует.

Современные интегральные коды по расчёту переходных и аварийных процессов в ядерных энергетических установках естественно не могут быть проверены на интегральных экспериментах, моделирующих в комплексе исследуемые процессы. Основой для доказательности получаемых расчётных результатов могут быть используемые данные дифференциальных экспериментов, отражающих протекание отдельных составляющих процессов. В этом случае ПИН конечных результатов включает в себя несовершенство методик дифференциальных составляющих процесса, погрешностей дифференциальных экспериментов, погрешности интегральной методики (взаимосвязи между дифференциальными процессами), включая упомянутые выше другие погрешности. Исследования ПИН результатов расчётов таких интегральных процессов весьма сложны и находятся в начальной стадии.

Проводимые в настоящее время в стране работы по анализу и оценке ПИН в показателях безопасности не охватывают разные виды ОИАЭ, не имеют единого идеологического и организационного подхода, основываются на энтузиазме и квалификации отдельных групп специалистов в различных организациях. Госатомнадзор в лице НТЦ ЯРБ в рамках проводимой аттестации ПС ставил задачу формулировки требований к отражению информации о ПИН в аттестуемых ПС. Проведённый по его инициативе научно-технический семинар [6] позволил представить ведущиеся в стране работы по отдельным направлениям для АС. В сборнике [6] имеется около 20 докладов и презентаций по некоторым из обозначенных направлений. Имеются работы, как общего теоретического плана, так и применительно к анализу проблемы ПИН для АС, главным образом для нейтронно-физических и теплофизических расчетов. Имеются два доклада по проблеме прочности. Работы по другим видам ОИАЭ не зафиксированы.

Многие соображения по проблеме ПИН из докладов [6] нашли отражения в данной статье. Необходимо отметить существенный разрыв в уровне подхода к приводимой информации в обосновывающих материалах и в научных статьях на эту тему.

Уже упоминалось о практически отсутствующей информации в материалах по 1-му блоку 2-й очереди ЛАЭС. Возможны случаи, когда приводимые показатели безопасности с учётом погрешностей выходят за рамки требований нормативных документов или принятых проектных пределов. В отсутствии нормативных требований по объ-

ёму и формату представления информации о ПИН в обосновывающих безопасность материалах регулирующему органу не представляется возможным самому решать, не выйдет ли приводимое значение показателя за допустимые значения с учётом возможных ПИН. В рамках вероятностного подхода к доверительным интервалам необходимы соответствующие нормативные требования, что является совместной задачей промышленности и регулирующего органа. Не исключено, что такие вероятностные критерии могут быть различны для показателей безопасности разной степени важности (аналогично подходу с различными коэффициентами запаса).

Всеобъемлющее решение проблемы ПИН требует решения задач на разных уровнях с привязкой к видам ОИАЭ и характерным для них процессам (см. рис.1). Верхний уровень должен включать теоретические разработки общего подхода к проблеме, включающие толкование понятий, возможные методы оценки ПИН (детерминистские, вероятностные, чувствительности и т.п.), необходимый для анализа математический аппарат, формат представления информации о ПИН и т.п. Общие теоретические подходы достаточно много освещены в литературе [4,6], поскольку в принципе этот вопрос не новый. Положения этого уровня знаний должны распространяться как на все виды ОИАЭ, так и на задачи различных тематических направлений каждого объекта (см. рис.1).

Второй уровень связан с решением задач ПИН для конкретных видов ОИАЭ и присущим им тематическим направлениям. Под видами ОИАЭ могут рассматриваться АС, радиохимические заводы, места хранения радиоактивных отходов и т.п. Для АС в качестве тематических направлений в первую очередь можно рассматривать нейтронно-физические расчёты, теплофизические расчёты, прочность конструкций и элементов, распространение радиоактивных веществ и излучений. Для других видов объектов тематические направления формируются со соответствующей спецификой объекта.

Решение задачи ПИН для каждого вида объекта и каждого тематического направления есть фактически отдельная научная задача в дополнение к первоначальной задаче расчёта протекания процессов и состояний систем. Её решение требует разработки соответствующего математического аппарата и ПС, что зачастую требует больших усилий по сравнению с первоначальной задачей.

Решение о достаточности обоснования безопасности рассматриваемого объекта основывается на функционировании следующей це-

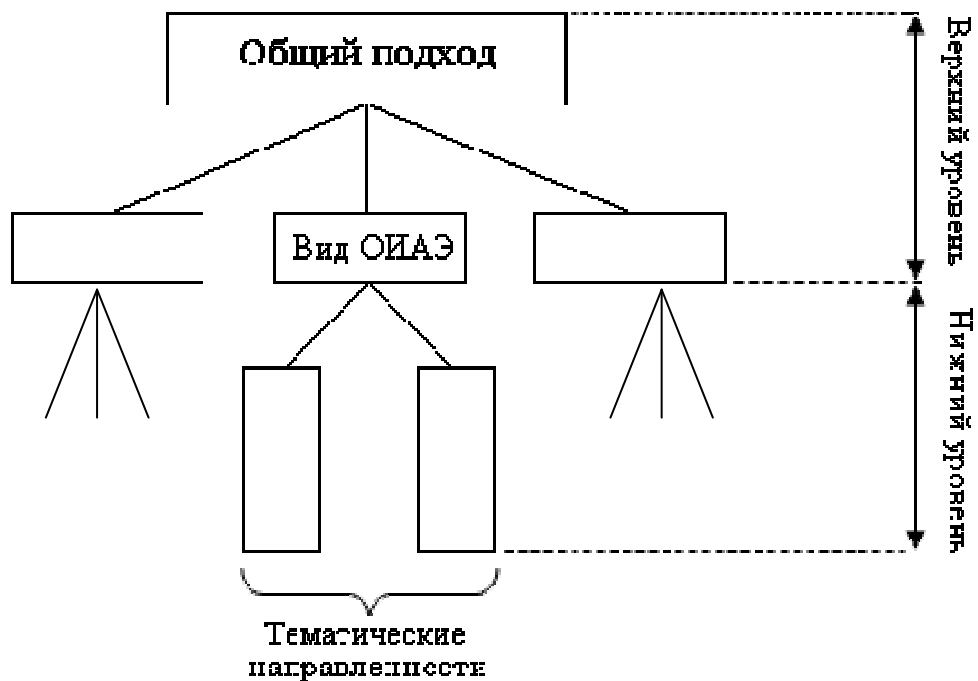


почки (см. рис.2). Научные исследования НИ, (теоретические и экспериментальные) приводят к созданию определенного ПС. В процессе НИ декларируются определенные ПИН<sub>НИ</sub>. При разработке ПС должны быть обозначены свои ПИН<sub>ПС</sub> в силу объективных возможностей при разработке данного ПС. Пользователи ПС (конструкторские, проектные, эксплуатирующие организации) при представлении в регулирующий орган (РО) обосновывающих безопасность материалов должны представить анализ ПИН<sub>ОИАЭ</sub> для анализируемого состояния или процесса конкретного объекта. РО совместно с привлекаемыми экспертами должен определить корректность расчетов и анализа ПИН и принять необходимое решение. Все упомянутые ПИН на одну и ту же тему отличаются друг от друга в силу разной постановки задачи, возможностей и квалификации исполнителей, приближенности к реальному объекту. Возникает задача их правильной интерпретации.

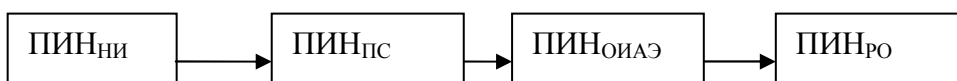
Для АС исследованиям по проблеме ПИН при расчётах аварийных процессов много внимания уделялось в Германии (GRS, [12]), Франции (IRSPN), Италии. Приведённые в [6] отечественные работы касаются как верхнего теоретического уровня [10, 11], так и нижнего уровня с анализом ПИН результатов расчёта по программам RELAP, ATHLET, КОРСАР, ТЕЧЬ и др. Как уже упоминалось, автор квантильных методов оценки неопределенностей [7, 8, 9] критически относится к используемым выше «детерминистическим» моделям (так автор их называет) путем варьирования неопределенностей исходных данных с применением генератора случайных чисел, т.е. метод Монте-Карло. Например, ставятся под сомнения результаты расчётов работы [13] относительно температуре твэл при аварии в реакторах РБМК. Одной из причин такого вывода заключается в «шуме» генераторов случайных чисел, вносящих неопределенности, сравнимые с неопределенностями по объективным причинам. Мы не собираемся здесь обсуждать достоинства и недостатки разных моделей оценки неопределённости. Сам факт наличия противоречивых подходов в этой проблеме говорит о необходимости серьезного внимания к ней.

**Возможные действия и решения.** В предыдущем разделе были изложены вопросы, которые, по мнению авторов, отражают негативные стороны состояния проблемы ПИН при обосновании безопасности ОИАЭ. В одной статье и усилиями одних авторов невозможно предложить всеохватывающие меры и пути изменения положения в положительную сторону. Для этого необходимы не тривиальные уси-

лия промышленности и регулирующих органов с их научными и проектными организациями. Здесь мы рассмотрим лишь возможные первоначальные шаги для изменения ситуации. В следующем разделе для нейтронно-физических расчётов ядерного реактора будут рассмотрены некоторые конкретные предложения.



*Рис. 1. Возможная схема решения проблемы погрешностей и неопределённостей для объектов использования атомной энергии*



*Рис. 2. Схема формирования и рассмотрения данных о ПИН*

Самым первым шагом как необходимое условие должно быть формирование регламентирующего требования об обязательном представлении информации о возможных погрешностях и неопределённостях относительно показателей безопасности, приводимых в обоснование безопасности объекта. Такое требование может быть отражено в документах типа “Общие положения” или “ТС ТОВ” для определённого вида объекта. Провозглашение этого основного требования сразу вызывает ряд вопросов: на какие характеристики объекта и процессов это распространяется, каков должен быть набор показа-

телей, характеризующих ПИН, какие рекомендовать методики и подходы, кто должен организовывать и проводить эту работу и т.д. Без ответа на эти вопросы само требование об анализе ПИН повисает в воздухе.

Следующим шагом является необходимость организовать некоторую систему по проведению работ по проблеме. Всю проблему можно представить в виде многоэтажного здания с крыльями. На верхних этажах осуществляется деятельность верхнего уровня (см. рис.1) с необходимой иерархией. Крылья отражают виды ОИАЭ и тематические направленности. Нижние этажи осуществляют деятельность в соответствии с задачами верхнего уровня, опять же с необходимой иерархией по этажам. Желательно, чтобы каждая рабочая ячейка в этом здании знала, на каком этаже и в каком крыле она находится, что необходимо для правильной оценки своих достижений в решении всей проблемы.

В качестве такого "здания" может быть специально организуемый межведомственный совет (с условным названием Совет по ПИН), распространяющий свою деятельность на виды и тематические направленности ОИАЭ. Действующие Совет по сбору данных о свойствах веществ при Росатоме и Совет по аттестации ПС при Ростехнадзоре должны влиться в эту общую структуру. Возникает вопрос, кто в первую очередь заинтересован в такой структуре, и кто будет финансировать эту работу. Обсуждение этого вопроса не предмет для научной статьи.

Остановимся далее на некоторых научных аспектах проблемы.

Относительно используемых понятий «погрешность» и «неопределённость» для однозначности предлагается использовать их в следующем толковании.

Если функционал  $Y$  зависит от параметров  $X_i$  и авторы расчётов получили некоторое значение  $Y_0$ , то под **погрешностью** можно понимать некоторое фиксированное (детерминированное) значение  $\Delta Y$ , которое авторы расчёта (или разработчики ПС) предписывают погрешностям от всех параметров  $X_i$ .

В этом случае возможное значение  $Y$  находится в интервале

$$Y = Y_0 \pm \Delta Y \quad (1)$$

В случае проведения анализа на погрешность  $Y_0$  от погрешностей  $n$  параметров  $X_i$  ( $i=1,2\dots n$ ), вместо (1) запишется

$$Y_n = Y_{0n} \pm \Delta Y_n \quad (2)$$

Используя понятие относительной чувствительности функционала  $Y$  по отношению к параметру  $X_i$  [4],

$$P_{Yi} = \lim_{\Delta x_i / \Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta Y / Y}{\Delta X_i / X_i}, \quad (3)$$

относительное изменение  $Y_o$  из-за погрешностей параметров с точностью до величин второго порядка (параметры  $X_i$  независимы) составит

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \sum_{i=1}^n P_{Yi} \times \frac{\Delta X_i}{X_i}, \quad (4)$$

где  $\frac{\Delta X_i}{X_i}$  - относительное изменение параметра  $i$ .

В случае зависимости  $X_i$  между собой необходим более сложный анализ с учетом коэффициентов корреляции, что существенно усложняет задачу.

Известно, что погрешности входных параметров имеют вероятностный характер, т.е. их значения имеют определённую функцию распределения плотности вероятности с соответствующими числовыми характеристикам. Комбинации вероятностных значений входных параметров приводят к функциям распределения плотности вероятности возможного значения функционала  $Y$ , когда возможные отклонения  $\Delta Y$  носят также вероятностный характер, т.е. доверительные интервалы с определенной вероятностью. Определение численных характеристик или распределение плотности вероятности таких отклонений можно связывать с понятием **анализ неопределённостей**.

Предлагаемое разделение понятий «погрешность» и «неопределённость» исходит из предпосылки, что для понятия «погрешность» в результатах расчета функционала  $Y = f(X)$  возможные отклонения входных параметров  $X$  от принимаемого основного значения  $X_o$  имеют детерминированное максимальное значение  $\Delta X$ , в то время как для понятия «неопределённость» возможные отклонения значения параметра  $X$  носят вероятностный характер с некоторым распределением плотности вероятности, где  $X_o$  есть среднеожидаемое значение, а  $\Delta X$  связано с дисперсией этого распределения.

При использовании вероятностного подхода к анализу неопределённостей мы сталкиваемся с весьма серьезной проблемой увязки получаемых расчетным или экспериментальным путем с декларируемыми нормативными документами ограничениями или допустимы-

ми значениями. Все наши существующие нормативные требования на этот счет построены на детерминированной, а не на вероятностной основе. Заявитель или эксперт должен дать однозначный ответ в двоичной системе («да» или «нет») на требование нормативного документа. Переход на вероятностную систему потребует переработки показателей о допустимых значениях и разработки подхода, что считать допустимым, а что не допустимым. Такой подход потребует нового уровня подготовки экспертов органов надзора.

В связи с упомянутой выше проблемой может возникнуть вопрос о генезисе всех допустимых значений показателей безопасности в нормативных документах. Все такие значения есть результат исследований со своими погрешностями и неопределённостями и вопрос в том, как они учтены в фиксированных значениях нормативных требований.

Относительно использования тех или иных моделей анализа ПИН, сейчас невозможно рекомендовать какие – либо предпочтения, т.к. различны как тематики и физические основы процессов, так и школы исследователей. Необходим накопленный опыт и совместное обсуждение.

Если для исследуемого с помощью расчётов функционала состояния или процесса имеется адекватный эксперимент (что является редким случаем для ОИАЭ), то исходя из того, что и расчёт и эксперимент обладают определёнными погрешностями, при сравнении необходимо представлять для обоих случаев источники погрешности и их показатели. В принципе результаты расчёта и соответствующего эксперимента представляют систему двух случайных событий со своими законами распределения плотности вероятности. Числовые характеристики двумерной случайной величины дают представление о характере закона распределения и о неопределённости истинного значения. Среднеожидаемые значения  $Y_{рас}$  и  $Y_{экс}$  определяют центр рассеяния истинной величины  $Y$  с величиной дисперсии, определяющих область возможных значений  $Y$ . Ту же аналогию можно привести для нескольких результатов независимых расчётов или независимых экспериментов при сравнении их между собой. .

В подавляющем числе случаев для ПС по расчёту свойств и процессов ОИАЭ является использование результатов эксперимента при построении отдельных составных частей всей методики или в виде замыкающих соотношений. Замыкающие соотношения аналогичны входным данным по свойствам веществ и их погрешности

должны быть учтены соответствующим образом. Влияние экспериментальных данных по отдельным частям на ПИН результатов расчёта по всей методике требует специального рассмотрения для каждой тематической направленности конкретного ОИАЭ. В качестве примера можно предложить отдельные работы [6].

Необходимо зафиксировать общие требования относительно набора основных показателей безопасности ОИАЭ, по значениям которых должен быть приведен анализ ПИН в обосновывающих материалах. Это, в первую очередь, показатели, допустимые значения которых зафиксированы в нормативных документах (например, допустимая температура оболочки ТВЭЛ при авариях на АЭС), а также принятые разработчиком проектные пределы.

Состояние проблемы по некоторым направлениям. Остановимся на состоянии вопросов ПИН в отрасли для нейтронно-физических расчётов ядерного реактора. В [6] на эту тему представлено 7 докладов (по первой фамилии авторов: Зарицкий С.М., Попыкин А.И., Болотов П.А, Тебин В.В., Васекин В.Н., Николаев М.Н., Хомяков Ю.С.).

В отличие от других тематических направлений нейтронно-физические расчёты ядерных реакторов и переноса излучений имеют многодесятилетнюю историю в своём развитии и соответствующие подходы к проблеме ПИН из-за достоверности ядерных констант. Ядерно-физические данные, в значительной степени определяющие проблему ПИН при расчётах ядерных реакторов, обрели достаточную базу на международном и национальном уровне. Методическая база хорошо отработана за счёт сбора и анализа расчётов и экспериментов по всему миру (Hand Book международного сборника бенчмарк экспериментов). Этой информации достаточно много и разной, чтобы оценивать уровень погрешностей при расчёте Кэф на большом разнообразии систем по составу и геометрии. Узаконенная практика “физического пуска” ядерных реакторов позволяет проводить эксперимент на реальных моделях и оценивать важные для безопасности характеристики (реактивность, поля нейтронов, эффективность СУЗ, температурные коэффициенты и др.).

Для стационарных задач верификация новых ПС ведётся, как правило, на основе сравнения результатов расчёта с результатами прецизионных (реперных) программ, получивших признание на международном уровне, а также зарекомендовавшие себя отечественные программы и файлы констант.

В качестве показателей точности расчётов в большинстве случаев приводятся относительные проценты, зачастую не указывая, к чему они относятся (экспериментам, реперным программам или к чему ещё). Иногда показатели точности в процентах включают в себя определённую обработку вероятностных показателей (дисперсий или доверительных интервалов), что оговаривается в научных работах, но редко в обосновывающих материалах.

Расчёты по аттестованным ПС переходных процессов в ядерных реакторах, не связанных с авариями, не всегда совпадают с результатами экспериментов на действующих блоках АЭС. Отсутствие достаточного анализа ПИН в нестационарных задачах оставляет открытым вопрос о достоверности наших знаний в этой области.

При аварийных процессах с сильными возмущениями по составу, геометрии и температуре активной зоны, где интегральных экспериментов провести невозможно, для решения проблемы ПИН необходимы серьёзные исследования, достаточное проведение которых не наблюдается. Без основательной информации на этот счёт остаются под вопросом принимаемые алгоритмы управления авариями, проектными и запроектными. При вероятностном анализе безопасности учёт ПИН может привести к нарушению всей принятой схемы развития аварий и значительному искажению результатов.

При сравнении результатов расчёта с данными отечественных экспериментов, как правило, не анализируются погрешности эксперимента и их влияние на погрешности расчёта. Относительно терминологии также не выдерживается единая линия.

Упомянутые выше предложения по выделению наиболее важных для безопасности показателей (назовём их критическими показателями), для которых необходимо обязательно проводить анализ ПИН, в области нейтронно-физических расчётов должны включать такие характеристики как температурные, плотностные (пустотные) и мощностные коэффициенты реактивности. В этом отношении характерна дискуссия, которая развернулась при согласовании новой редакции ПБЯ АС между концерном Росэнергоатом и Ростехнадзором относительно упомянутых коэффициентов в 2007 году. Компромиссная формулировка, в разработке которой авторы принимали участие, была бы эффективней, если бы к требованиям по обоснованию были добавлены слова “с учётом погрешностей и неопределённостей”.

**Заключение.** Целью настоящей статьи является обратить внимание на проблему погрешностей и неопределённостей при обосновании безопасности ОИАЭ и обозначить основные проблемные вопросы. Настоящее состояние по теме характеризуется как отдельные

не связанные между собой спорадические усилия на разных уровнях науки, расчётных исследований, обработки экспериментов, регулирующей деятельности. Решение всей проблемы, если признать, что она существует, может быть только результатом специальной целевой программы. Усилия отдельных организаций и отдельных специалистов не смогут решить всю проблему. В качестве первого иницилирующего и мобилизирующего шага следует узаконить требование обязательного анализа погрешностей и неопределённостей для приводимых в обоснование безопасности важных для безопасности показателей ОИАЭ. Разработка таких требований также требует немалых усилий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Усачёв Л.Н. Уравнение для ценности нейтронов, кинетика реактора и теория возмущений. В кн. Материалы международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Госэнергоиздат, 1958, с.598.
2. Орлов В.В. О функциях ценности в теории возмущений для расчёта характеристик реакторов. В кн. Вопросы физики ядерных реакторов. Труды ФЭИ. Вып.1. Обнинск, 1968, с.38.
3. Усачёв Л.Н., Бобков Ю.Г. Теория возмущений и планирование эксперимента в проблеме ядерных данных для реакторов. М., Атомиздат, 1980.
4. Погрешности расчётов защиты от излучений. Под ред. В.П. Машковича. Энергоатомиздат, 1983.
5. Отраслевая система стандартных (оцененных) данных о физических константах и о свойствах веществ и материалов в ядерной науке, техники и технологии. Журнал «Атомная стратегия XXI века». Июль 2006.
6. Румянцев А.Н. Метод квантильных оценок неопределенностей. Атомная энергия, 2007, т.102, вып.4, с.208-215.
7. Румянцев А.Н. Квантильная оценка неопределенностей вероятностного анализа безопасности объектов ядерной энергетики. Атомная энергия, 2006, т.101, вып.3, с. 167-176.
8. Румянцев А.Н. прогнозирование безопасности в ядерной энергетике. Атомная энергия, 2007, т.102, вып.2, с.80-85.
9. Точность и неопределённость программных средств, используемых для обоснования безопасности ОИАЭ. Всероссийский научно-практический семинар. Труды НТЦ ЯРБ. М. 2007.
10. Glaeser H., Hofer T., Kloss M., Scores T. Uncertainty and sensitivity analysis of post-experiment calculation in thermal-hydraulics.-Reliability Engineering System, 1994, №45, p.19-33.
11. Ефремов Д.А., Журавлев Ю.В., Миронов Ю.В., Радкевич В.Е, Методика статистического анализа неопределенностей теплогидравлических расчетов. Атомная энергия, 2002, т.93, вып.2, с.101-109.
12. Ковалевич О.М. Современные задачи вероятностного анализа безопасности объектов использования атомной энергии. – Там же, 2008, т. 104, вып. 2, с. 3-6



# КРИЗИС И БЕЗОПАСНОСТЬ В ТЕХНОГЕННОЙ СФЕРЕ

*Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*

*№ 4, 2009*

## **1. Введение**

Разразившийся в мире и стране кризис ставит вопрос о его влиянии на безопасность. Ставя задачу понять взаимоотношение этих двух комплексных и, в первом приближении, абстрактных понятий, необходимо определиться с набором качественных и количественных показателей, на которые их можно расщепить и по которым можно анализировать их влияние друг на друга. Взаимодействие этих категорий в целом есть взаимодействие с обратной связью, т.е. кризис влияет на безопасность, а события, связанные с изменениями безопасности, влияют на протекание кризиса. Увеличение кризиса приводит, по крайней мере, к снижению безопасности, а снижение безопасности с происходящими негативными событиями приводит к усугублению кризиса.

Причины возникновения кризиса, национальные и международные, есть финансовые и экономические процессы в мире и в странах, оказывающие влияние также на развитие кризиса после его возникновения. Влияние обусловленных кризисом процессов на связанные с безопасностью процессы проявляется после начала кризиса, включая эффекты обратной связи. Связанные с безопасностью процессы сливаются с общими процессами кризиса, и выделить составляющую

безопасности на основе анализа динамики общих показателей кризиса не просто.

Показатели кризиса и показатели безопасности могут быть как качественные, так и количественные. Представляющая интерес задача сводится к анализу влияния изменений показателей кризиса на показатели безопасности и наоборот, а также к возможности специальными мерами управлять этими процессами.

В качестве обобщающего количественного показателя кризиса, вероятно, является финансовый показатель (рубль, доллар и т.п.), хотя не все показатели в обеих категориях можно привести к количественному виду. Не всегда количественным изменениям показателей одной категории можно противопоставить изменения в количественных показателях другой категории и разработать математическую модель для анализа. В большинстве случаев приходится оперировать качественными показателями и оценке влияния количественных показателей на качественные и наоборот.

Анализ взаимодействия кризиса и безопасности может проводиться на разных уровнях - глобальном, национальном, отраслевом и на уровне конкретного предприятия (объекта). В данной работе мы не будем касаться мирового уровня и сосредоточимся в основном на объектовом и отраслевом уровне.

Из многочисленных аспектов, связанные с понятием "Безопасность" [1], мы будем рассматривать только аспекты, связанные с понятием "Безопасность в техногенной сфере" [2].

## **2. Показатели кризиса и показатели безопасности**

Из многочисленных показателей кризиса необходимо выбрать те, которые влияют на безопасность.

Состояние безопасности в стране зависит от развитости научно-технической базы, правовой и нормативной базы, культуры безопасности и т.п. Предшествовавшее кризису состояние является как бы начальным условием развития состояния безопасности рассматриваемых структур во время кризиса.

Кризис на деятельность всех структур в государстве, связанных с безопасностью, в основном будет определяться снижением соответствующими финансовыми затратами на государственном, отраслевом и объектовом уровне. Отраслевой уровень подразумевает государственные и частные предприятия отрасли.

В первом приближении можно рассматривать следующие показатели кризиса, влияющие или способные повлиять на безопасность в техногенной сфере.

На государственном уровне:

- Сокращение принятого бюджетного финансирования на федеральные научно-технические программы по безопасности;
- Сокращение финансирования деятельности федеральных органов контроля и надзора за безопасностью в техногенной сфере;
- Ослабление требований к гражданско-правовой ответственности за нанесение ущерба.

На отраслевом и объектовом уровне:

- Снижение затрат на поддержание объекта в безопасном состоянии;
- Сокращение затрат на обеспечение качества важной для безопасности продукции;
- Снижение уровня квалификации привлекаемого персонала.

Интересуемые показатели безопасности могут быть также рассмотрены на трёх уровнях - государственном, отраслевом, объектовом.

На государственном уровне:

- Увеличение количества чрезвычайных ситуаций в стране с градацией по количеству пострадавших;
- Увеличение количества чрезвычайных ситуаций в стране с градацией по принесённому ущербу;
- Рост нарушений нормативно — правовых актов по обеспечению безопасности, зафиксированных органами контроля и надзора.

На отраслевом и объектовом уровне:

(Аналогично показателям на государственном уровне с привязкой к отрасли и к объекту).

### **3. Постановка абстрактной задачи**

Рассмотрим первоначально постановку некой абстрактной задачи для абстрактного объекта, которую будем называть "точечной".

Пусть имеется и некоторый объект техногенной сферы с некоторыми абстрактными показателями безопасности на соответствующем уровне. В момент времени  $t=0$  начинает действовать кризис с определёнными показателями, в результате которого начинают гене-

рироваться изменения в показателях безопасности. Изменения в показателях безопасности рассматриваемого объекта начинают из-за эффектов обратной связи негативно сказываться на показателях кризиса. "Точечность" подразумевает как свёртывание возможных государственных структур к объекту, так и свёртывание к одному обобщённому показателю кризиса и к одному обобщённому показателю безопасности объекта.

Будем считать, что эффект кризиса проявляется в уменьшении затрат на обеспечение безопасности какого-либо объекта (снижение объёма техобслуживания, закупка некачественного оборудования, снижение квалификации привлекаемого персонала и др.).

Введём понятие "**дефицит безопасности**". Уменьшение затрат на обеспечение безопасности будем называть "финансовым дефицитом безопасности" (ФДБ). В момент времени  $t=0$  уменьшение затрат на обеспечение безопасности обозначим величиной  $z_0$ . В дальнейшем функция снижения затрат на безопасность непосредственно из-за кризиса  $z_{кр}$  может оставаться постоянной или быть зависимой от времени (см. рис.1) в зависимости от ситуации в отрасли, в стране, в мире. Образующийся дефицит безопасности не может пройти бесследно, т.к. начинают возрастать мелкие **нарушения**, которые создают предпосылки для реализации **аварий**. Авария, если она происходит, влечёт за собой **ущерб**, за который объекту надо платить в определённой степени. Даже при отсутствии аварии работа объекта с дефицитом безопасности в системе развитого страхования потребует дополнительных страховых затрат (если вообще такая работа будет разрешена регулирующим органом). В любом случае появляется обратная связь между иницирующими отрицательными затратами  $z_{кр}$  и затратами вследствие эффектов обратной связи  $z_{oc}$ , обусловленные ущербом от нарушений аварий и страховыми расходами. Считаем, что дополнительные затраты обратной связи реализуются за счёт уменьшения затрат на обеспечение безопасности. Таким образом, будем считать, что ФДБ выражается функцией уменьшения затрат

$$z_B(t) = z_{кр}(t) + z_{oc}(t) \quad (1)$$

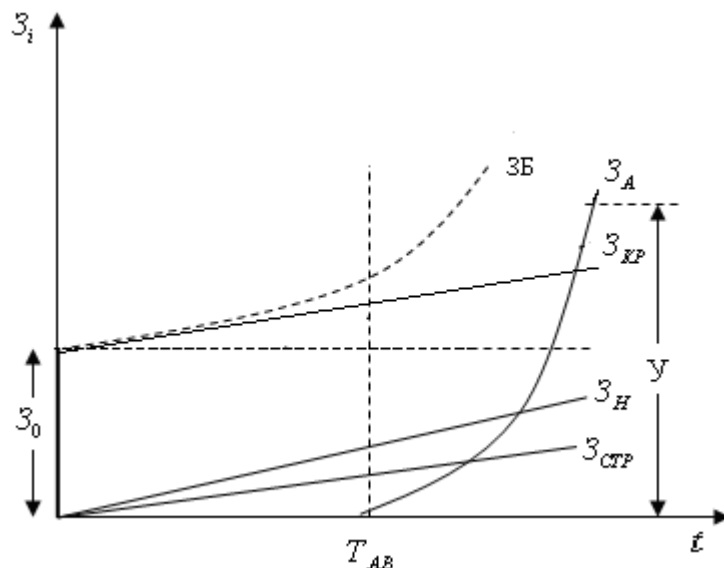


Рис.1. Зависимость различного вида затрат от времени.

Затраты на компенсацию ущерба от нарушений и аварий, которые можно разделить на две составляющие  $z_H$  и  $z_A$ , отличающиеся по времени, характеру своего проявления и масштабу финансовых затрат. Будем считать, что нарушения и соответствующие затраты  $z_H$  появляются при  $t=0$  и возрастают со временем. Затраты  $z_A$  от чрезвычайных ситуации в виде **крупных аварий** носят вероятностный характер и поэтому время наступления затрат на компенсацию ущерба от них носит случайный характер.

Финансовый дефицит безопасности в виде функции  $z_B(t)$  для конкретного объекта будет определять "технический дефицит безопасности" (ТДБ), выражающийся в изменении многочисленных показателей безопасности, присущих данному объекту. Примем, в рамках принятого "точечного приближения", что обобщённым показателем безопасности является частота  $W$  (вероятность в единицу времени) реализации **крупных** (тяжёлых) аварий, как это принято в вероятностном анализе безопасности для атомных станций. Происходящие изменения в обеспечении безопасности приведут к возрастанию частоты крупных аварий  $W(t)$ . При  $t=0$ , т.е. до начала кризиса, значение  $W = W_0$  характеризует принятое и обосновываемое значение показателя безопасности рассматриваемого объекта при получении разрешения на его эксплуатацию. Имеется некоторое допустимое значение  $W_{доп}$ , при превышении которого работа объекта либо не допускается, либо необходимо идти на определённый риск продолжения работы объекта из-за важности его работы. Перед государством в момент кризиса стоит не простой вопрос, позволить или не позволить функциониро-

вание объектов с недопустимыми дефектами безопасности в виде  $W(t) > W_{доп}$  или с вероятностью крупных аварий  $P$  больше определенного значения  $P_{доп}$ , когда для редких событий вероятность с частотой связана соотношением (2).

$$P(t) = \int_0^t W(t) dt \quad (2)$$

Наличие зависимости  $W$  или  $P$  от ЗБ (см. рис. 2) является одной из наиболее трудных научно-технических задач. Составной частью этой задачи является определение изменений детальных показателей безопасности объекта в зависимости от ЗБ, т.к. без этого невозможно анализировать и отразить изменения в  $W(t)$  и  $P(t)$ .

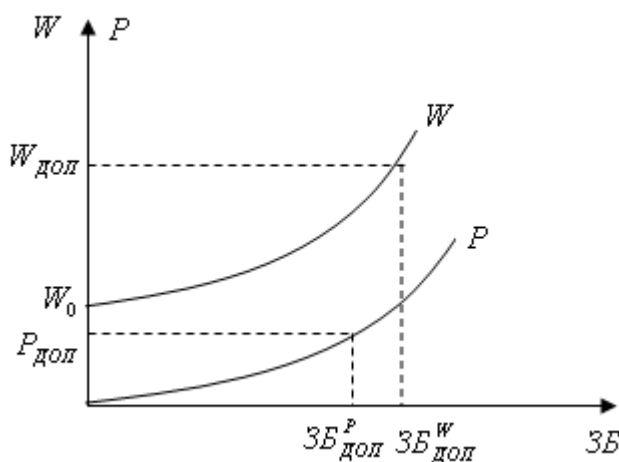


Рис.2. Изменение частоты аварий  $W$  в зависимости от финансового дефицита безопасности ЗБ.

Затраты на страхование  $з_{стр}$  будем считать зависят от длительности работы с изменяющимися дефицитами безопасности и принятыми тарифами страхования  $К_{стр}$  на единицу времени работы на единицу дефицита безопасности. За дефицит безопасности будем принимать абсолютное изменение частоты  $W$ :

$$з_{стр} = K_{стр} \int_0^t [W(t) - W_*] dt \quad (3)$$

где  $К_{стр}$  - принятый для данного подхода страховой тариф с соответствующей размерностью, а за  $W_*$  брать либо  $W_0$ , либо  $W_{доп}$ .

Возможно также за изменение ТДБ брать относительное изменение  $W(t)$  к  $W_0$  или  $W_{доп}$ .

Особого рассмотрения требуют накопленные страховыми компаниями средства на случай крупных аварий. Известно, что в странах с развитой системой страхования от крупных аварий на сложных тех-

нических объектах были накоплены значительные средства (например, атомные станции), поскольку крупных аварий и, следовательно, расходов не было за последний достаточно длительный период. Обсуждался вопрос о привлечении этих средств к поддержанию или повышению безопасности страхуемых объектов. При наличии таких средств возможно рассмотрение вопроса об их привлечении к покрытию или ослаблению кризисных эффектов. Ниже мы затронем этот вопрос вместе с другими источниками ослабления кризиса.

До момента возможной крупной аварии  $T_{AB}$  затраты на произведенный ею ущерб учитывается интегралом страховых взносов согласно (3). Если крупная авария происходит за время реализации кризиса, то будем считать, что затраты на компенсацию ущерба от неё значительно превышают накопленные страховые взносы. В этом случае с момента  $T_{AB}$  предлагаемая схема не работает, так как объект можно считать не функционирующим и здесь могут работать более сложные схемы страхования, рассмотренные в [3].

Время реализации аварии  $T_{AB}$  является случайной величиной и среднеожидаемое ее значение  $\bar{T}_{AB}$  может быть оценено из соотношения:

$$\bar{T}_{AB} = \dots \quad (4)$$

В силу принятой катастрофической ситуации при реализации аварии ограничивающими факторами становятся условия  $W(t) < W_{доп}$  или  $P(t) < P_{доп}$  (см. рис.3) с соответствующими ограничивающими временами  $T_{доп}^W$  и  $T_{доп}^P$ .

Ущерб от возникающих нарушений в работе (функция  $Z_H$ ) будем, как и для расходов по страхованию, связывать с интегралом к моменту  $t$  с ТДБ в виде  $W(t)$  аналогично (3), но с другим коэффициентом пропорциональности  $K_H$ :

$$Z_H(t) = K_H \int_0^t [W(t) - W_*] dt \quad (5)$$

Таким образом, имеем для дальнейшего рассмотрения:

$$Z_B(t) = Z_{KP}(t) + Z_{СТР}(t) + Z_H(t) \quad (6)$$

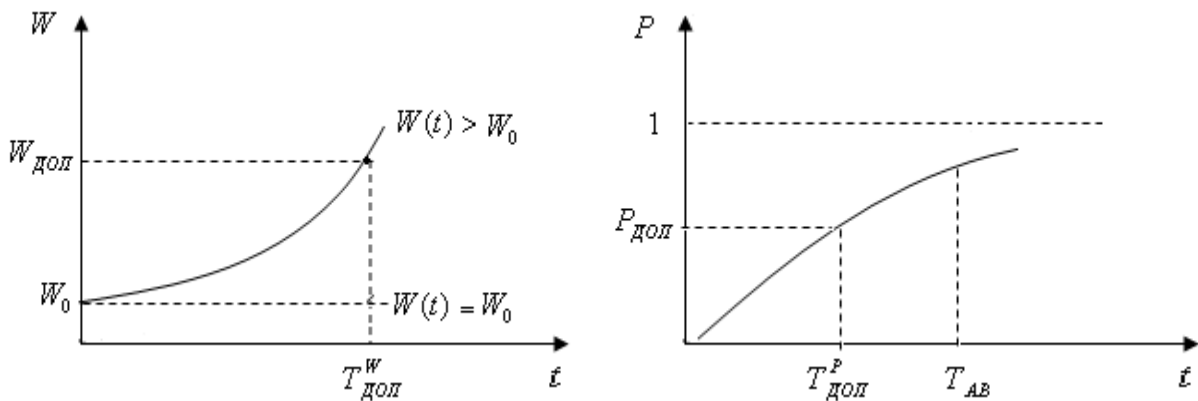


Рис.3. Зависимость частоты  $W$  и вероятности  $P$  крупной аварии от времени

Выше мы изложили подход к идентификации и взаимодействию основных составляющих в процессе кризиса в точечном приближении. Задача сводится к определению составляющих функции  $ZБ(t)$  согласно (1) и определению допустимого момента времени  $T_{доп}$  функционирования объекта в условиях кризиса с учётом принятых решений по допустимому риску относительно частоты или вероятности крупных аварий. Для конкретного объекта "крупная авария" означает потерю объекта, для отрасли — компенсация ущерба и негативное отношение к отрасли со стороны общества и государства, для государства - значительные затраты и усугубление кризиса.

#### 4. Формирование возможных математических моделей

Примем функцию увеличения затрат на обеспечение безопасности непосредственно из-за кризиса  $Z_{кр}(t)$  в виде

$$Z_{кр}(t) = Z_0 \times e^{\frac{t}{\tau_{кр}}}, \quad (7)$$

где  $\tau_{кр}$  - постоянная времени изменения внешнего финансирования из-за кризиса.

Функция  $Z_{кр}(t)$  в виде (7) в нашем рассмотрении считается заданной. На ее характер влияет динамика кризиса в стране, в отрасли.

Вообще говоря, изменения в ТДБ, т.е. в изменении частоты возможных крупных аварий  $W(t)$ , отслеживает изменения  $ZБ(t)$  с запаздыванием по времени  $T_{зап}$ , т.е.

$$W(t) = W_0 + K_w \times ZБ(t - T_{зап}) \quad (8)$$

где  $K_w = \frac{dW}{d(ZБ)}$  - принимаемый постоянный коэффициент пропорциональности изменения частоты на единицу изменения  $ZБ$  с размер-



ностью [1/рубль.год]. Но для упрощения последующего решения общего уравнения примем  $T_{3АП} = 0$ . Также будем считать, что коэффициент  $K'_{СТР}$  в (3) учитывает коэффициент  $K_H$  в (5), т.к. они стоят перед одним и тем же интегралом, т.е.

$$3_H + 3_{СТР} = K_{СТР} \int_0^t [W(t) - W_*] dt \quad (9)$$

$$K_{СТР} = K'_{СТР} + K_H$$

На основании (7)-(9) получаем для анализа следующее упрощенное уравнение, связывающее основные показатели и определяющее динамику финансового дефицита безопасности:

$$3Б(t) = 3_0 e^{\frac{t}{\tau_{КР}}} + K_{СТР} K_W \int_0^t 3Б(t) dt \quad (10)$$

Дифференцируя (10) получим:

$$\frac{d(3Б)}{dt} = \frac{3_0}{\tau_{КР}} e^{\frac{t}{\tau_{КР}}} + K_{СТР} K_W 3Б(t) \quad (11)$$

Уравнение типа (11) является линейным дифференциальным уравнением первого порядка, решение которого будет [4, стр.440]:

$$3Б(t) = 3_0 e^{Kt} \left[ \frac{1}{\tau_{КР} K} (1 - e^{-Kt}) + 1 \right] \quad (12)$$

где

$$K = K_{СТР} K_W \quad (13)$$

В решении (12) изменение  $3Б(t)$  в значительной степени определяется постоянной  $K$ , имеющей размерность обратного времени (1/год), т.е.  $\tau_w = \frac{1}{K}$  есть характерное время процесса. Напомним, что

$$[K_{СТР}] = \left[ \frac{d(3Б)}{d(\int W dt)} \right] = \frac{\text{рубль}}{\text{ед.б} - \text{сти.год}} \quad (14)$$

$$[K_W] = \left[ \frac{d(W)}{d(3Б)} \right] = \frac{\text{ед.б} - \text{сти}}{\text{рубль}}$$

и  $[K_W K_{СТР}] = \text{год}^{-1}$  независимо от размерности единиц безопасности (ед. б-сти).

Рассмотрим случай, когда дефицит безопасности непосредственно из-за кризиса начинает с нуля линейно возрастать с постоянной времени  $\tau_{KP}$  и постоянной скоростью  $z_{KP}$ , т.е.:

$$3B_{KP}(t) = z_{KP}t \quad (15)$$

Тогда основное уравнение вместо (10) будет

$$3B(t) = z_{KP}t + K \int_0^t 3B(t)dt \quad , \quad (16)$$

где  $K = K_{CTP}K_W$  как и в (12).

Решение (16) составит

$$3B(t) = z_{KP}\tau_w(e^{Kt} - 1) \quad (17)$$

Как мы видим здесь, как и в (12), фигурирует характерное время

$$\tau_w = \frac{1}{K} = \frac{1}{K_{CTP}K_W} \quad (18)$$

Рассмотрим некоторые предельные случаи для (12) и (17):

$$\underline{K \cdot t \ll 1}$$

$$\text{Из (12): } 3B(t) = 3_0 \left( \frac{t}{\tau_{KP}} + 1 \right) \quad (19)$$

$$\text{Из (17): } 3B(t) = z_{KP} \cdot t \quad (20)$$

Представляет интерес понять «физический» смысл коэффициента  $K$  и характерной постоянной времени  $\tau_w = \frac{1}{K}$ . Из (12) и (17) ясно, что  $\tau_w$  определяет рост дефицита безопасности с учетом эффектов обратной связи. Связь времени  $\tau_w$  с формирующими его коэффициентами  $K_{CTP}$  и  $K_W$  может быть пояснена следующим образом:

Снижение затрат на безопасность на 1 рубль приводит к изменению показателя безопасности на  $K_W$  единиц безопасности. Работа с дефицитом безопасности в одну единицу безопасности в течение единицы времени требует дополнительного увеличения затрат  $K_{CTP}$  рублей (увеличение дефицита безопасности). Таким образом, эффективное время  $\tau_w = \frac{1}{K}$  есть характерное время изменений в дополнительных затратах (дефицита безопасности) через обратную связь на произошедшие ранее изменения в дополнительных затратах (дефицитах безопасности).

Другими словами  $\tau_w$  есть время запаздывания проявлений эффектов обратной связи.

Время  $T_{доп}$  достижения объектом состояния, когда дальнейшая работа в сложившихся условиях считается невозможной, определяется согласно (8) при  $T_{зап} = 0$  из соотношения

$$\Delta W = K_w \cdot 3B(T_{доп}), \quad (23)$$

где

$$\Delta W = W_{доп} - W_0 \quad (24)$$

С учетом (12) получим уравнение для определения  $T_{доп}$

$$\frac{\Delta W}{K_w \cdot 3_0} \cdot \frac{\tau_w}{\tau_{кр}} = e^{T_{доп} / \tau_w} \left[ \left(1 - e^{-T_{доп} / \tau_w}\right) + \frac{\tau_w}{\tau_{кр}} \right] \quad (25)$$

Для случая согласно (15) имеем уравнение для определения  $T_{доп}$  в виде

$$\frac{\Delta W}{K_w \cdot z_{кр} \cdot \tau_w} = e^{\frac{T_{доп}}{\tau_w}} - 1 \quad (26)$$

Несмотря на ограниченный набор учитываемых факторов и отсутствия количественных показателей проведенное рассмотрение и полученные соотношения (25) и (26) позволяют сделать ряд общих выводов:

- 1) Выявлено характерное время  $\tau_w = \frac{1}{K} = \frac{1}{K_{стр} K_w}$ , влияющее на изменение дефицита безопасности с учетом обратной связи. Чем  $\tau_w$  будет больше, тем медленнее объект будет приближаться к определенному состоянию.
- 2) Безразмерные комплексы в левой части (25) и (26) в значительной степени определяют допустимое время работы с дефицитами безопасности.
- 3) Время работы с дефицитами безопасности в значительной степени зависит от величины  $\Delta W$ , т.е. до кризисного запаса показателя безопасности по отношению к предельно допустимому.

## **5. Возможная роль системы страхования в противодействие кризису и сохранению уровня безопасности**

Обозначим вначале участников данного процесса. Кроме **объекта**, выступающего как **страхователь**, играют роль **страховая компания (страховщик)**, **государство** в лице двух органов: регулирующей орган по контролю за безопасностью и страховой надзор. Функции каждого будут затрагиваться в процессе дальнейшего изложения.

Рассмотренные в [2] различные схемы страхования гражданской ответственности за компенсацию возможного ущерба третьим лицом, так или иначе, определяют аккумуляцию определенных финансовых средств для данных целей. Такие деньги в зависимости от схемы страхования накапливаются либо у предприятия (группы предприятий), либо у страховых компаний.

Высказывается предложение в данной статье рассматривать кризисные явления как страховой случай и использовать накопленные для страховых случаев средства на нейтрализацию или ослабление влияний кризиса на безопасность. Другим возможным способом содействовать ослаблению влияния кризиса на безопасность является пересмотр страховых тарифов как от объекта в докризисном состоянии, так и в состоянии после кризисных изменений.

В работе [3] отмечалось, что существует разный подход в оценке безопасности конкретного объекта у регулирующего органа и у страховой компании. От подхода последней зависят страховая сумма и страховые тарифы. Регулирующий орган только следит за тем, чтобы эксплуатирующая организация формально выполняла бы этот ритуал гражданской ответственности, но, похоже, в существо предъявляемых страховыми компаниями подходов не вмешивается. Каждый занят своим делом.

В кризисной ситуации, когда, как рассматривалось выше, дефициты безопасности могут возникать из-за экономии средств на обеспечение безопасности как в рамках предкризисных тарифов на страхование, так и от увеличения страховых тарифов из-за дефицитов безопасности. В то же время работа объекта с пониженными показателями безопасности есть прямая ответственность регулирующего органа. Именно ему предстоит решать вопрос о возможности продолжать работу объекта с показателями безопасности от принятого в докризисный период значения  $W_0$  до допустимого значения  $W_{доп}$ , которое ему же предстоит обозначить. Возникает вопрос, являются ли дефициты безопасности одинаковыми в понимании регулирующего органа и в понимании страховщика.

Таким образом, возможны два аспекта постановки задачи о роли системы страхования в кризисный период. Первый аспект – это возможность использования ранее накопленных средств от страховых взносов, и второй – упорядочить подходы к страховым взносам в период кризиса.

### **6. Роль регулирующего органа и легитимные меры**

Предлагаемый подход не может обойтись без соответствующей позиции регулирующего органа и нормативного обеспечения необходимых действий. Затрагиваются два важных вопроса. Первый – отношение регулирующего органа к продолжению работы объекта с дефицитами безопасности до определенного уровня, второй – использование накопленных средств страховых фондов на ослабление влияния кризиса на безопасность.

Показатели безопасности реального потенциально опасного объекта техногенной сферы это есть никем не подсчитанное количество требований (показателей), отраженных в сотне и тысяче нормативных документах для определенного вида объекта. Никто не анализировал «статвес» каждого показателя в обеспечении полномасштабной безопасности. Преобладает лозунг «Безопасность превыше всего». Вся система контролирующих и надзорных органов работает по принципу безусловного выполнения всех требований. В реальной жизни, однако, приходится сталкиваться с явлениями, не укладывающимися в упомянутый лозунг. За ужесточающимися требованиями по безопасности не успевают установки более раннего поколения. Практикуется подход так называемых «компенсирующих мер», призванных оправдать формальное невыполнение современных требований по безопасности. Насколько «компенсирующие меры» заменяют действующие требования по безопасности остается предметом договоренности регулирующего органа с промышленностью.

Кризисная ситуация и работа с дефицитами безопасности можно рассматривать как «компенсирующие меры» в обратном направлении, когда из множества действующих требований по безопасности выбираются избыточные или мало влияющие на конечную безопасность требования, отказ от выполнения которых позволил бы скомпенсировать финансовые дефициты безопасности.

Следует признать, что реализация такого подхода, если даже будет принято волевое решение о его целесообразности, видится весьма проблематичным.

Дело не только в том, что посчитать «избыточными» требованиями, хотя сторонников этого достаточно. Основная проблема будет в самом факте отступления от «принятых требований», что касается взаимоотношений многих государственных структур. Действующий до сих пор лозунг «Безопасность превыше всего» трансформируется на «взвешенный и ответственный подход».

Что касается использования накопленных средств страховых фондов (если они имеются), то поскольку это связано с перераспределением собственности, здесь не обойтись без государственных правовых актов.

В заключение заметим, что для эффективного воздействия на кризисную ситуацию предлагаемые меры должны будут осуществляться во времена, сравнимые с временем развития кризиса. Для преодоления всех легитимных бюрократических препятствий нужны будут за короткое время энергичные действия многих государственных структур.

#### Литература.

1. Безопасность России. Анализ рисков и проблем безопасности. 4 тома. М. МГФ Знание, 2007г.
2. Ковалевич О.М. Риск в техногенной сфере. Издательство МЭИ. М. 2006.
3. Ковалевич О.М. Возможные модели системы компенсации и страхования ущерба. ПБЧС, 2002, вып.1.
4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М. 1957.

## НЕОБХОДИМЫЕ АСПЕКТЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПОГРЕШНОСТЕЙ И НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЕЙ<sup>4</sup>

*Ядерная и радиационная безопасность,  
№ 4, 2009*

### **Введение**

В работе [1] была высказана озабоченность относительно отражения вопросов погрешностей и неопределённостей (ПИН) в обосновывающих безопасность материалах объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). Данная проблема неоднократно поднималась и ранее [2,3,4]. Можно назвать три основные причины неудовлетворительного в целом положения. Первая – отсутствие чётких нормативных требований о представлении в регулирующий орган информации по анализу ПИН, вторая – отсутствие количественных и качественных методических указаний по анализу ПИН для различных видов ОИАЭ с присущим им состояниям и процессам, третья – отсутствие единого научного подхода к проблеме ПИН, способного объединить усилия специалистов с различными точками зрения, включая взаимоотношение экспериментальных и расчётных данных.

Решение поставленной задачи не может быть осуществлено силами одной группой специалистов или одной организацией. Требуются осознание того факта, что проблема есть и её надо решать

---

<sup>4</sup> *Статья написана в соавторстве с А.Н. Румянцевым*

широким фронтом на отраслевом уровне с привлечением теоретиков, расчётчиков, проектантов, эксплуатационников, регулирующих органов. Не исключено, что эта проблема присуща многим другим отраслям. Рассматриваемые ниже соображения пытаются обозначить векторы первоначальных усилий в решении данной проблемы для ОИАЭ.

Предлагаются для рассмотрения следующие аспекты:

- некоторые основные термины и их толкование в рамках темы;
- используемые теоретические подходы по анализу ПИН и их интерпретация:
- учёт результатов анализа ПИН при обосновании безопасности;
- предложения по системе нормативных документов, затрагивающих данную тему;
- контуры нормативного документа верхнего уровня с требованиями проведения ПИН (рамочный документ);
- возможная система нормативных и методических документов для проведения анализа ПИН в необходимом объёме;
- взаимоотношения экспериментальных и расчётных данных при определении ПИН;
- учёт анализа ПИН при обосновании безопасности атомных станций.

### **Используемые термины и их толкование**

Рассматриваемая тема требует определиться с используемыми в дальнейшем терминами:

1. ВИД ОБЪЕКТА – ОИАЭ, предназначенный для выполнения определённой задачи (АЭС, ИР, пункты хранения РАО и т.п.).
2. ТЕМАТИЧЕСКОЕ НАПРАВЛЕНИЕ – научно-технические области в исследовании безопасности определённого вида ОИАЭ.
3. ВАЖНЫЙ ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЬ(ВБП) – показатель состояния ОИАЭ, характеризующий его безопасность.
4. БАЗОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ  $X_0$  – значение ВБП по показателю  $X$ , представляемое для обоснования безопасности.
5.  $X_{доп}$  – допустимое значение показателя  $X$  согласно требованиям правил и норм или принятым проектным критериям.
6. ПОГРЕШНОСТЬ АБСОЛЮТНАЯ – возможное абсолютное значение отклонения ВБП от базового значения  $X_0$ .
7. ПОГРЕШНОСТЬ ОТНОСИТЕЛЬНАЯ – отношение абсолютной погрешности к базовому значению  $X_0$ .



8. НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЬ – характеристики вероятностного отклонения значения ВБП от базового значения  $X_0$ .

9. РЕПЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ – оценённые экспериментальные данные по определённой проблеме с минимально достижимой точностью, используемые для верификации программных средств(ПС).

10. ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ – эксперимент, направленный непосредственно на получение значений ВБП.

11. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ – эксперимент, направленный на получение входных данных при расчётном анализе ВБП.

Прокомментируем мотивы введения обозначенных терминов. Понятие “вид объекта” и “тематическое направление” введены для того, чтобы выделять различные ОИАЭ и различные методы анализа присущих им процессам и состояниям. Понятие ВБП позволяет из множества показателей выделить для анализа погрешностей и неопределённостей разумное количество наиболее важных для безопасности показателей. Понятие “базовое значение  $X_0$ ” фиксирует анализируемое значение ВБП, полученное в результате основного анализа. Разделение понятий “погрешность” и “неопределённость” с соответствующими толкованиями есть новое предложение в рамках рассматриваемого подхода. Также новыми являются понятия “дифференциальный и интегральный эксперимент”, введённые для их идентификации и влияния на конечный результат расчёта, влияния на погрешности и неопределённости интересуемых конечных показателей.

### **Используемые общие подходы к анализу погрешностей и неопределённостей**

Имеется несколько подходов при анализе погрешностей и неопределённостей результатов расчёта значений функционала от нескольких переменных, связанных между собой системой уравнений. Мы коснёмся только методов и подходов, используемых при решении характерных задач в области использования атомной энергии. В [3] рассматривались некоторые анализы ПИН для АС при разных подходах. В [14] приведён обзор используемых подходов при анализе ПИН для теплогидравлических процессов.

Условно имеющиеся работы можно разделить на два уровня – общий теоретический уровень и специфический тематический уровень для определённой задачи, хотя не во всех известных работах

можно провести такое разделение, когда авторы затрагивают оба уровня.

Из известных общих подходов оценки ПИН выделим следующие:

- (1).Метод обобщённой теории возмущений.
- (2).Метод чувствительности.
- (3).Метод Монте-Карло
- (4).Метод теории нечётких множеств.
- (5).Метод квантильных оценок.

### **Метод обобщённой теории возмущений**

Данный метод на основе теории возмущений с применением сопряженных функций был разработан трудами Л.Н.Усачёва и В.В.Орлова [4,5] при расчётах характеристик ядерного реактора (критичность, защита от излучений, коэффициент воспроизводства и др.). Данный метод позволил рассчитывать коэффициенты чувствительности для различных реакторных параметров. Метод основан на теории сопряжённых функций для кинетического уравнения переноса нейтронов. Для возможности использования данного метода в других областях тематической направленности (другие системы уравнений) необходима разработка соответствующей теории сопряжённых функций.

### **Метод чувствительности**

Метод чувствительности позволяет достаточно простым, но трудоёмким способом определять влияние неточностей входных параметров на неточность конечного результата[5].

Если функционал  $Y$  зависит от параметров  $X_i$  и авторы расчётов получили некоторое значение  $Y_0$ , то под **погрешностью** можно понимать некоторое фиксированное (детерминированное) значение  $\Delta Y$ , которое авторы расчёта (или разработчики ПС) предписывают погрешностям от всех параметров  $X_i$ . В этом случае возможное значение  $Y$  находится в интервале

$$Y = Y_0 \pm \Delta Y \quad (1)$$

В случае проведения анализа на погрешность  $Y_0$  от погрешностей  $n$  параметров  $X_i$  ( $i=1,2\dots n$ ), вместо (1) запишется

$$Y_n = Y_{0n} \pm \Delta Y_n \quad (2)$$

Используя понятие относительной чувствительности функционала  $Y$  по отношению к параметру  $X_i$  [4]

$$P_{Y_i} = \lim_{\Delta x_i / \Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta Y / Y}{\Delta X_i / X_i}, \quad (3)$$

относительное изменение  $Y_0$  из-за погрешностей параметров с точностью до величин второго порядка (параметры  $X_i$  независимы) составит

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \sum_{i=1}^n P_{Y_i} \times \frac{\Delta X_i}{X_i}, \quad (4)$$

где  $\frac{\Delta X_i}{X_i}$  - относительное изменение параметра  $i$ .

В случае зависимости  $X_i$  между собой необходим более сложный анализ с учетом коэффициентов корреляции, что существенно усложняет задачу.

### **Метод Монте-Карло**

Метод Монте-Карло (ММК) при определении ПИН исходит из того, что погрешности входных параметров имеют вероятностный характер, т.е. их значения имеют определённую функцию распределения плотности вероятности с соответствующими числовыми характеристикам. Комбинации с помощью генератора случайных чисел вероятностных значений входных параметров приводят к функциям распределения плотности вероятности возможного значения функционала  $Y$ , когда возможные отклонения  $\Delta Y$  носят также вероятностный характер, т.е. доверительные интервалы с определенной вероятностью. Определение численных характеристик или распределение плотности вероятности таких отклонений можно связывать с понятием **анализ неопределённостей**.

Предлагаемое разделение понятий «погрешность» и «неопределенность» исходит из предпосылки, что для понятия «погрешность» в результатах расчета функционала  $Y=f(X)$  возможные отклонения входных параметров  $X$  от принимаемого основного значения  $X_0$  имеют детерминированное максимальное значение  $\Delta X$ , в то время как для понятия «неопределенность» возможные отклонения значения параметра  $X$  носят вероятностный характер с некоторым распределением плотности вероятности, где  $X_0$  есть среднеожидаемое значение, а  $\Delta X$  связано с дисперсией этого распределения.

С помощью ММК был произведён анализ ПИН при оценке риска от АЭС в США [6]. В [3] подход ММК отражён статьёй Исламова Р.Т.[7] и целым рядом работ для АЭС по отдельным тематическим

направлениям. В Европе для анализа теплогидравлических характеристик аварийных процессов на АС были использованы различные модификации, в том числе с применением формулы Уилкса [14].

Сомнения в достаточной корректности метода Монте-Карло при анализе ПИН высказаны в работе [8].

### **Метод теории нечётких множеств**

Указанный метод обсуждается в литературе [9,10] как один из методов анализа риска при недостаточной (“скудной”) информации и соображения об использовании этого подхода к анализу неопределённостей. Поскольку авторам данной статьи неизвестны работы по использованию данного метода применительно к задачам объектов использования атомной энергии, дальнейшее обсуждение возможностей данного метода мы касаться не будем.

### **Метод квантильных оценок**

Предложенный метод в [2] метод квантильных оценок (МКО) неопределенностей высокоэнтропийных логарифмических распределений является приближенным аналитическим методом анализа погрешностей, неизбежных при прогнозировании параметров редких событий в условиях значительной неопределенности в исходной информации и ‘скудости знаний’ относительно механизмов возникновения и протекания таких процессов. Оценка точности самого метода выполнена с использованием сформулированных предельных теорем теории вероятностей для логарифмических распределений и прямым сравнением результатов, полученных с применением МКО, с результатами численного моделирования по методу Монте-Карло. Определены возможные максимальные погрешности МКО при анализе итоговых логарифмических распределений, не превышающие 5% в значениях СКО, 15% в значениях медианы, 5%-го и 95%-го квантилей.

Показано, что применение МКО позволяет существенно, на 4-5 порядков, снизить затраты вычислительных операций в сравнении с методом Монте-Карло при обеспечении соизмеримой точности результатов анализа неопределенностей. Важным преимуществом МКО в сравнении с методом Монте-Карло является то, что МКО создает принципиально новые возможности для анализа ошибок при моделировании нестационарных аварийных процессов. Кроме того, применение МКО позволяет существенно расширить возможности экспертных систем анализа ситуаций и прогнозирования развития процессов.

Анализ имеющихся работ по оценке погрешностей и неопределенностей при расчёте состояний и процессов на атомных станциях

[3] показывает, что в большинстве случаев авторы к анализу конкретного состояния или процесса применяют выбранный ими метод оценки ПИН, не анализируя возможности и сравнения результатов других методов. Исключение представляет работа [8], где проводится сравнение результатов оценки неопределённостей по методу Монте-Карло и по методу квантильных оценок. Данный факт отражает общее состояние с проблемой ПИН на сегодняшний день. Иметь результаты по выбранной методике это проще и лучше, чем не иметь ничего. Провести анализ по нескольким методикам и сравнить результаты – это слишком большая работа, неподъёмная одному или группе авторов. Целенаправленное исследование, где и при каких условиях лучше использовать ту или иную методику, не проводилось.

### **Учёт результатов анализа ПИН при обосновании безопасности**

Проведенный анализ ПИН по той или иной методике относительно полученного ранее "базовому" значению  $X_0$  ставит вопрос о соотношении полученных характеристик ПИН с допустимым значением  $X_{\text{доп}}$ .

В случае характеристики ПИН в виде "погрешности" (согласно принятому термину, абсолютной или относительной) принимаемым условием может быть доказательство не выхода значения  $X_0$  совместно со значением погрешности за допустимое значение  $X_{\text{доп}}$ . Данное требование кажется очевидным, но формально нигде не отражено и не комментируются условия его применения при обосновании безопасности.

В случае вероятностного отклонения показателя  $X$  от  $X_0$  вопрос о взаимоотношении  $X_0$  совместно с вероятностными отклонениями и допустимого значения  $X_{\text{доп}}$  требует особого рассмотрения.

Ситуация осложняется тем, что действующая нормативная база и подстраиваемые под неё проектные критерии, призванные обеспечивать безопасность, в соответствии с детерминированным подходом требуют абсолютного не нарушения допустимых значений рассматриваемого показателя. Под этот принцип, кстати, подстраивается вся административная и уголовная ответственность за нарушение правил и норм. Реальность однако такова, что с малой, но с определённой степенью вероятности допустимые значения могут быть нарушены. Препятствием на пути отклонения значений  $X$  от  $X_0$  должны стать ограничения на значения вероятностей таких отклонений, включая ограничения на вероятность выхода за допустимое значение  $X_{\text{доп}}$ .

В любом случае для вероятностного представления о возможных отклонениях  $X$  от  $X_0$  необходимо иметь функцию распределения вероятности  $F(X)$  и формирующую её функцию плотности вероятности  $f(x)$ . В предположении  $X_{доп} < X_0$  и  $f(X)$  симметрично относительно значения  $X_0$  вероятность превзойти  $X_{доп}$  тем меньше, чем быстрее  $F(X)$  стремиться к 1 по мере возрастания  $X$ , т.е. чем уже распределение плотности вероятности (меньше среднеквадратичное отклонение  $\sigma$ ) (см. рис. 1). Вероятность превзойти  $X$  значение  $X_{доп}$  составит

$$P_{доп} = 1 - F(X_{доп}) \quad (1)$$

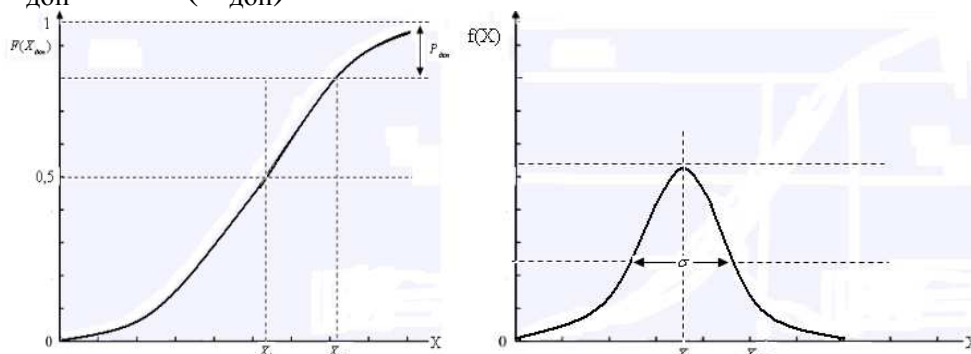


Рис. 1. Функции распределения вероятности и плотности вероятности с базовым и допустимым значением показателей  $X_0$  и  $X_{доп}$ .

При нормальном распределении  $f(X)$  со среднеквадратичным отклонением  $\sigma$  для разных значений безразмерного параметра

$$\frac{\Delta X}{\sigma} = \frac{X_{доп} - X_0}{\sigma} \quad (2)$$

вероятность отклонения  $X$  за значения  $X_{доп}$ , рассчитанной с учётом функции Лапласа [12], представлена в таблице 1.

Таблица 1.

Вероятность  $P_{доп}$  отклонения показателя  $X$  в зависимости от

$$\frac{\Delta X}{\sigma} = \frac{X_{доп} - X_0}{\sigma}$$

$\frac{\Delta X}{\sigma}$	0	1	2	3	4
$P_{доп}$	0,5	0,34	0,023	1,3.10 <sup>-3</sup>	3,3.10 <sup>-5</sup>

Таким образом, не достаточно для показателя  $X$  обозначить допустимое значение  $X_{доп}$ . Необходимо указать вероятность, с которой мы хотим гарантировать не превышение значения  $X_{доп}$ . Сделать это возможно проанализировав факторы, влияющие на неопределенность результатов, с получением функции распределения вероятности. Как уже отмечаюсь, это принципиально новый момент в отечественной практике регулирования безопасности. Для внедрения такого подхода необходима разработка общей идеологии определения значений ве-

роятности не превышения допустимых значений. Указанные вероятности по смыслу есть другая форма коэффициентов запаса с количественно-вероятностной их интерпретацией. Большая дисперсия полученного базового значения  $X_0$  после анализа ПИН, согласно таблице 1, говорит о высокой вероятности превышения допустимых значений.

5. Контуры нормативного документа верхнего уровня (рамочный документ).

Анализ погрешностей и неопределённостей при обосновании безопасности является достаточно новым и трудоёмким процессом. Название документа предлагается как “Основные подходы к оценке погрешностей и неопределённостей при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии”. Основная задача документа – зафиксировать обязательное требование представлять регулирующему органу в ТОБе анализ погрешностей и неопределённостей важных для безопасности показателей. Подчеркнём, что речь идёт о результатах анализа для показателей и состояний конкретного объекта, а не ссылки на возможные методики.

В рамках данного документа не возможно и не предполагается определять номенклатуру ВВП для каждого ОИАЭ. Дается указание на необходимость разработки такого перечня по каждому из интересующих видов объектов в документах нижнего уровня по характерным тематическим направлениям. Там же подлежат разработке тематические направления для анализа ПИН для данного вида объекта.

Ввиду разнообразия существующих и используемых методик оценки ПИН вопрос о рекомендуемых методиках по конкретному виду объекта и для отдельного тематического направления должен быть отнесён к специальным методическим указаниям. Отметим, что это является одним из сложных вопросов построения всего подхода к оценке ПИН в силу отмеченных в [1] противоречий в используемых на сегодня подходах. Пока не ясно, нужно ли вообще предписывать использование конкретных методик или оставить этот вопрос на рассмотрение заявителя. В последнем случае существенно осложнится задача регулирующего органа и экспертизы, поскольку им предстоит быть судьёй выбранной заявителем методики. Потребуется значительное время и большой объём совместной работы всех заинтересованных специалистов и организаций, прежде чем будет найдено решение этого вопроса.

В документе не следует фиксировать набор источников ПИН, по которым должен быть проведён анализ. Достаточно привести воз-

возможный перечень таких источников с предоставлением заявителю выбирать необходимые позиции для анализа с обоснованием выбранных или отсутствующих источников.

Должна быть обозначена система необходимых нормативных документов низшего уровня в соответствии с приводимыми ниже соображениями.

### **Система нормативных документов в области анализа ПИН**

Одним рамочным документом верхнего уровня не обойтись. Необходима целая система соответствующих документов.

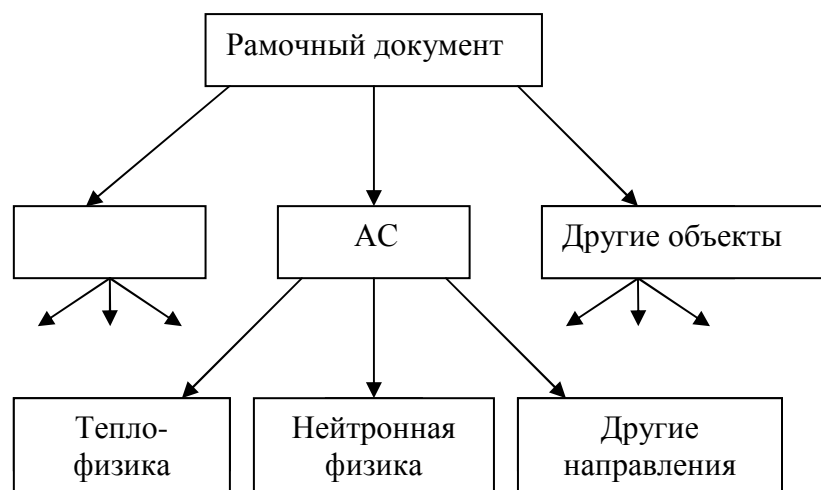
На рис.2 представлена схема предлагаемой системы нормативных документов для анализа ПИН. Под рассмотренным рамочным документом верхнего уровня, распространяющегося на все интересующие ОИАЭ, располагаются ветви документов низшего уровня (АС, РХЗ, ПУНКТЫ ХРАНЕНИЯ РАО и др.). В первую очередь необходимо сформировать ветвь документов для АС как наиболее опасного вида объектов.

Первым документом каждой ветви вслед за рамочным документом будет документ, определяющий характерные черты данного ОИАЭ (тематические направления для анализа ПИН, необходимые для анализа источники погрешности и т.п.). Следующим нижележащим документом для данного вида объекта предполагается иметь рекомендуемые методические указания по проведению анализа ПИН для каждого тематического направления.

### **Соотношения экспериментальных и расчётных данных при анализе ПИН**

Проблема взаимоотношений результатов эксперимента и расчёта при обосновании безопасности носит многоплановый характер. Первое необходимое условие, что все экспериментальные установки и получаемые с их помощью результаты должны соответствовать установленным требованиям проведения эксперимента и обработки результатов [12]. При представлении результатов эксперимента должны быть проанализированы возможные погрешности и соответствующим образом оформлены.





*Рис.2. Схема структуры системы нормативных документов в области анализа ПИН.*

Экспериментальные данные по отношению к ПИН конечного интересующего показателя могут иметь прямое отношение, если имеется возможность поставить прямой, т.е. интегральный эксперимент.

Результаты интегрального эксперимента и результаты расчёта могут сравниваться только при наличии анализа ПИН того и другого. Более доверительным будет результат с существенно меньшей дисперсией. Оценка погрешности расчёта при сравнении с экспериментом может быть корректной только при обосновании значительно большей точности эксперимента.

При сравнении между собой результатов эксперимента и расчёта с близкими по величине дисперсиями вывод о возможных значениях ПИН искомого показателя требует специального рассмотрения.

Поскольку интегральный эксперимент далеко не всегда возможен, важное значение имеют дифференциальные эксперименты и влияние погрешностей их результатов на погрешности конечного показателя. Результаты дифференциальных экспериментов с соответствующей оценкой ПИН являются входными данными для получения расчётным путём базовых значений необходимых показателей и анализа ПИН этих показателей.

В последние годы результаты дифференциальных и интегральных экспериментов, включаемые в анализ теплогидравлических процессов АС, кроме традиционной стандартной обработки результатов эксперимента подвергаются сравнению с результатами вариационных расчетов [13]. Для обрабатываемого эксперимента определяется набор входных параметров кода, влияющих на неопределенность расчетного результата, вместе с функциями плотности вероятности

входных параметров. В результате серии расчетов, выполненных при различных значениях параметров, определяются доверительные интервалы расчетных зависимостей. В случае если экспериментальные зависимости находятся в расчетном доверительном интервале, полученный набор входных параметров может быть использован для анализа неопределенности режимов на реальной установке после дополнения параметрами, отражающими специфику реальной установки. Следует отметить, что подобный подход возможен при условии признания приоритета экспериментальных данных и после анализа адекватности экспериментальной и реальной установки и оценки точности эксперимента во всём рассматриваемом диапазоне.

Аналогичная ситуация наблюдается в отношении анализа ПИН в области нейтронно-физических характеристик [14].

Следует остановиться об отношении к эксперименту при использовании атомной энергии, как в военных, так и в мирных целях, и сравнить этот подход с подходом в других отраслях с технически сложными и опасными объектами, например, авиация, космос, ядерное оружие. Требование к проведению дифференциальных экспериментов для подтверждения работоспособности и надёжности отдельных элементов и систем сложного и опасного объекта стало уже нормой и является необходимой составной частью разработки и сооружения такого объекта. Работоспособность в целом всего объекта зависит от функционирования его частей в необходимых заданных пределах каждого из них по отношению к другим. Возможные отклонения параметров взаимодействия в силу неизбежных погрешностей и неопределённостей каждого приводят к необходимости проводить интегральные эксперименты. И здесь возникает не тривиальная задача об экономических возможностях и опасности таких экспериментов.

Чрезмерно большие затраты на интегральный эксперимент сталкиваются с целесообразностью сооружения объекта с экономической точки зрения. Государству в определённых ситуациях приходится идти на не чисто экономические критерии, а с учётом других факторов (военных, политических и т.п.). Безопасность объекта по отношению к населению зависит от вложенных затрат, в данном случае от затрат на интегральный эксперимент. Без интегрального эксперимента безопасность не может быть обеспечена согласно действующим нормативным требованиям, сложившейся практике или в результате определённого беспокойства научной общественности. В этом случае

возможны следующие крайние альтернативные действия. Либо (1) государство идёт в целях обеспечения безопасности будущего объекта на чрезмерные расходы по интегральному эксперименту, либо(2) организует основательные теоретические исследования по обоснованию надёжного функционирования сложной системы при наличии достаточной базы дифференциальных экспериментов. Последнее также требует определённых затрат и изменения в идеологии подхода при обосновании безопасности сложных систем. Приведённые альтернативы являются крайними случаями и возможны промежуточные случаи ( полумасштабный интегральный эксперимент и соответствующие теоретические исследования).

Применительно к безопасности атомных станций высказанные соображения также сводятся к необходимости поиска оптимального соотношения между интегральным или полумасштабным экспериментом и теоретическими исследованиями. И то и другое в настоящее время нельзя назвать удовлетворительным.

### **Требования к оценке и учёту результатов анализа погрешностей и неопределённостей при обосновании безопасности атомных станций**

Поясним вышесказанное на примере обоснования безопасности с учётом анализа ПИН атомных станций (АС). Результаты таких анализов должны быть отражены в ТОБ АС.

Подлежат анализу следующие тематические направленности, отражающие важные для безопасности тематические направления:

- нейтронно-физические характеристики;
- теплогидравлические характеристики;
- прочностные характеристики;
- радиационные характеристики.

Для нейтронно-физических характеристик блока должна быть произведена оценка ПИН по следующим важным для безопасности показателям:

- коэффициент критичности для всех рассматриваемых в проекте состояний реактора;
- эффективность органов СУЗ в различных предусмотренных проектом комбинациях их функционирования и состояниях реактора;
- мощностные, температурные, паровые и др. коэффициенты реактивности для всех рассматриваемых состояний реактора;
- величины нейтронного потока и флюенса в критических точках реактора;

- уровень мощности при физическом пуске реактора;
- уровень мощности при переходных процессах;

Для теплогидравлических характеристик блока должна быть произведена оценка ПИН по следующим важным для безопасности показателям:

- максимальные температуры твэл (оболочки, сердечника) при нормальной эксплуатации;
- максимальные температуры твэл при переходных и аварийных процессах в критических точках по объёму и во времени;
- объёмное паросодержание (среднее по активной зоне);
- расход теплоносителя через активную зону при авариях с нарушением циркуляции теплоносителя;
- давление в первом контуре при авариях с потерей герметичности;

Приведённые показатели могут быть расширены при разработке таких документов. Также должны быть определены показатели для анализа других тематических направлений.

### **Заключение**

Конечной целью решения предлагаемой проблемы погрешностей и неопределённостей является достижение такого положения, когда в обосновывающих безопасность материалах относительно важных для безопасности показателей ОИАЭ будет представлен анализ и приведены оценки возможных погрешностей и неопределённостей. Теоретические исследования по проблеме, погрешности результатов экспериментов, неточности используемых программных средств, анализ ошибки расчётчиков – всё это является необходимыми этапами в достижении поставленной конечной цели.

В рамках поставленной цели в работе представлены следующие результаты, которые можно рассматривать как первые шаги по решению всей проблемы.

1. Предложен некоторый набор терминов с их толкованием, необходимых для однозначного понимания обсуждаемых вопросов.
2. Предложена разница в толковании терминов “погрешности” и “неопределённости”.
3. Проведён обзор известных теоретических методов анализа погрешностей и неопределённостей.
4. В известных работах по анализу погрешностей и неопределённостей методы анализа для определённых тематических направлений АС выбираются самими авторами анализа.

5. Обозначены рамки предлагаемого нормативного документа по требованиям проведения анализа погрешностей и неопределённостей и основные положения такого документа.
6. Обсуждается построение возможной системы нормативных документов разного уровня по проблеме погрешностей и неопределённостей.
7. Предложены показатели излагаемого подхода для АС.

Дальнейшие усилия всех затрагиваемых сторон должны быть направлены и объединены на развитие каждого этапа и на достижения поставленной конечной цели.

### **Литература**

1. Ковалевич О.М., Строганов А.А. Погрешности и неопределенности при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии. Атомная энергия, т.106, вып.2, февраль 2009, с.68 – 75.
2. Румянцев А.Н. Прогнозирование безопасности в ядерной энергетике. – Там же, 2007, т. 102, вып.2, с.80-85.
3. Точность и неопределённость программных средств, используемых для обоснования безопасности ОИАЭ. Сб. докл. Всерос. Научно-практ. сем. М., НТЦ ЯРБ, 2007.
4. Погрешности расчёта защиты от излучений. Под редакцией В.П. Машкевича. Энергоатомиздат, 1983.
5. Усачёв Л.Н. Уравнение для ценности нейтронов, кинетика реактора и теория возмущений. В книге Материалы международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Госэнергоиздат, 1958, с.598.
6. Sever Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants. NUREG-1150, 1990.
7. Исламов Р.Т. Анализ неопределённостей детерминистических моделей. См. сборник докладов по п.3.
8. Румянцев А.Н. Квантильная оценка неопределённостей вероятностного анализа безопасности объектов ядерной энергетике. АЭ, 2006, т. 101, вып.3, с.167-176.
9. Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Часть 2. Новосибирск, Наука. 2005.
10. Коваленко О.В., Петрин С.В. Вероятностный анализ безопасности сложных систем. Сборник Анализ безопасности установок и технологий. Часть 6. Саров. 2006.
11. ГОСТ Р ИСО 5725-20902 Части 1-6 Точность (правильность) и прецизионность методов и результатов измерений.
12. Парфёнов Ю.В., Мелихов В.И., Мелихов О.И. Анализ неопределённости и чувствительности результатов расчёта кодом АТЛЕТ экспериментального режима с большой течью теплоносителя на стенде БК В-213./Сб. докл. Всероссийский Научно-практический семинар.- М.: НТЦ ЯРБ, 2007.

# К ВОПРОСУ О СУММИРОВАНИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ И НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЯХ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

*Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций  
№ 4, 2010*

## 1. Введение

Действующая *линейная теория суммирования повреждений* основывается на предположении, что повреждения от прилагаемых пакетов нагружения не коррелируют между собой и действуют независимо. Вносимые от каждого  $i$ -го пакета относительные повреждения в материале определяются как отношение приложенного числа циклов  $N_i$  к разрушающемуся числу циклов  $N_{oi}$ , которые при суммировании не должны превышать единицу. Физика твёрдого тела и механика разрушений пока не даёт возможности иметь количественную информацию о возможных повреждениях в материале до того момента, как образец будет разрушен по тем или иным критериям. Одним из критериев разрушения образцов при циклических нагрузках является образование и развитие микротрещин до определённого размера и соответствующая теория является попыткой получить информацию о функции вероятности образования и развития повреждений [1,2].

Для построения функции образования и развития повреждений необходима определённая информация о состоянии металла в процессе нагружения до момента его разрушения. Изменения таких характеристик металла в процессе испытаний как температура, элек-

тропроводность, теплоёмкость, различные прочностные характеристики возможно могут дать количественную информацию об образующихся повреждениях в металле. Развитие нанотехнологии может способствовать прогрессу в этом направлении.

## **2. Предпосылки к формированию функции вероятности повреждений**

Обозначим функцию развития и образования повреждений от приложения  $N$  циклов при напряжений  $\sigma_i$  как  $F_i(N)$ . Данную функцию можно интерпретировать как детерминистскую и как случайную (вероятностную). Детерминистский характер её проявляется в постулировании определённых изменений состояния материала, которые могут быть в принципе измерены соответствующим аппаратным оснащением. Случайный характер определяется тем, что значения этих характеристик определяется набором случайных величин, отражаемых в рассеянии получаемых экспериментальных данных. В работе В.В.Болотина [2] эта функция фигурирует под названием *мера повреждения*, отражая детерминистский её характер. Мы будем называть её *вероятностью повреждений*, акцентируя внимание на её вероятностном характере и подразумевая вероятность доли накопленных повреждений от предельных повреждений, приводящих к разрушению.

Следует предположить, что каждый пакет нагружения оставляет следы в структуре используемого материала, которые суммируясь при определённом наборе пакетов приводят к разрушению. Мы не знаем, по какому закону образуются и накапливаются повреждения для определённого материала при конкретных условиях нагружения. Но такая функция объективно существует и её можно интерпретировать как вероятность образования повреждений в зависимости от циклов нагружения  $N$  при данном напряжении  $\sigma_i$ . Примем не без оснований, что функция  $F_i(N)$  непрерывная и возрастающая от 0 до 1. Вероятность повреждений составляет 1 при количестве циклов  $N \rightarrow \infty$  или при некотором допустимом значении  $N_{oi}$ , когда происходит принятое разрушение материала. Функции  $F_i(N)$ , представляющей собой распределение вероятности, соответствует функция плотности вероятности образования повреждений  $f_i(N)$ . На рис.1 качественно представлены возможные различные виды таких функций: линейный, нормальный, экспоненциальный двух типов. Представленные кривые отражают возможные характерные разновидности роста повреждений: постоянный на всём интервале нагружения (1), области с интен-

сивным образованием повреждений вокруг определённого центра рассеяния(2), быстрый рост вначале и замедленный в конце(3) и, наоборот, медленный в начале и быстрый в конце(4).

Дальнейшие наши рассуждения не направлены на поиски функций распределения или плотности вероятности повреждений, отражающих поведение конкретных материалов при определённых нагрузках. Этой проблеме посвящены многочисленные исследования [2,3]. Наше рассмотрение касается трёх задач. Первая – предложить подход к суммированию повреждений от нескольких пакетов нагружений при известных функциях повреждений. Вторая – сравнить суммарные повреждения от двух гипотетических функций вероятности повреждений в прямом и обратном направлении при предложенном подходе к суммированию повреждений. Третья – попытаться обозначить подход к оценке неопределённостей основных показателей циклической прочности.

### **3. Предлагаемый подход к суммированию повреждений**

Проводимые экспериментальные исследования предполагают достаточно большое для корректной статистики количество испытываемых образцов  $n_0$ . Обычно испытания сводятся к определению доли разрушившихся образцов  $F_p = n_p/n_0$  в зависимости от циклов нагружения, что рассматривается как *функция вероятности разрушения* в зависимости от количества циклов. На рис.2а и2б представлены типичные кривые функций распределения вероятности разрушения  $F_p(N)$  и соответствующие функции плотности вероятности  $f_p(N)$ . Основными численными характеристиками таких распределений являются математическое ожидание  $\tilde{N}_p$  и средне квадратичное отклонение  $\Delta_p$ . Количество циклов  $N_p$ , когда будут разрушены все образцы, требует большого времени испытаний и обычно не представляет интереса. Такие испытания называют *базовыми испытаниями* [2].

За величину  $N_0$  на рис.1, когда вероятность повреждений достигает 1, в принципе можно взять из рис.2 либо величину  $\tilde{N}_p$ , либо величину  $N_p$ , когда разрушены все образцы, либо какую другую величину. На практике за величину  $N_0$  берут количество циклов  $N_{1p}$ , соответствующее разрушению первого образца из всей испытываемой партии в  $n_0$  образцов. Статистический разброс не исключает случаев разрушения образцов при количестве циклов  $N$  меньше  $N_{1p}$ , но считается, что это может произойти с гораздо меньшей вероятностью, чем при  $N_0 = \tilde{N}_p$ . Возникает вопрос, насколько меньше и какие это вероятности.



Рассмотрим подход к суммированию повреждений при нескольких пакетах нагружения. Функции распределения вероятности повреждений для каждого пакета нагружения считаем заданными.

В начале рассмотрим случай из двух пакетов нагружения с напряжениями  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  и распределениями вероятности  $F_1$  и  $F_2$  (см. рис.3). Пусть первоначально произошло нагружение пакетом 1 с числом циклов  $N_1$ . Вероятность повреждений составит величину  $F_1(N_1)$ . Вслед за этим происходит нагружение пакетом 2. Примем следующую гипотезу.

*Накопленные в материале повреждения от первого пакета с вероятностью  $F_1(N_1)$  переносятся на функцию вероятности повреждений второго пакета  $F_2(N)$  с той же величиной вероятности повреждений. Дальнейшее нагружение пакетом 2 с количеством циклов  $N_2$  происходит с учётом накопленных повреждений от первого пакета в соответствии с вероятностью повреждений  $F_2(N)$  (см. рис.3).*

Из предложенной гипотезы вытекает следующее равенство:

$$F_1(N_1) = F_2(N_2^*), \quad (1)$$

где  $N_2^*$  – число циклов при нагружении пакетом 2, эквивалентное по вероятности повреждений нагружению пакетом 1 с числом циклов  $N_1$ .

Вероятность суммарного количества повреждений после нагружения пакетом 2 составит:

$$F_{12} = F_2(N_2^* + N_2), \quad (2)$$

Если очередность нагружения поменяется (2 + 1), то по аналогии

$$F_{21} = F_1(N_1^* + N_1), \quad (3)$$

где  $N_1^*$  – число циклов при нагружении пакетом 1, эквивалентное по вероятности повреждений при нагружении пакетом 2 с числом циклов  $N_2$ .

Поскольку  $F_1(N)$  и  $F_2(N)$  отличающиеся функции, говорить априори о равенстве  $F_{12}$  и  $F_{21}$  не приходится. Ниже мы проиллюстрируем это на примерах.

При множестве пакетов нагружения с напряжениями  $\sigma_i$  и числом циклов  $N_i$  каждый пакет вносит свой вклад  $\Delta F_i$  в суммарную вероят-

ность повреждения (см.рис.4), причём приращение повреждений на каждом этапе составит

$$\Delta F_i = F_i(N_i^* + N_i) - F(N_i), \quad (4)$$

где  $N_i^*$  находится из условия

$$F_{i-1}(N_{i-1}) = F_i(N_i^*), \quad (5)$$

Полная вероятность повреждений от всех пакетов нагружения составит

$$F = \sum_i \Delta F_i, \quad (6)$$

и не должна превышать единицу.

При достаточно малом отрезке  $N_i$  на интервале  $[0; N_{0i}]$  величину  $F$  согласно (6) и (4) можно представить в виде:

$$F = \sum_i \frac{dF_i}{dN} \cdot \Delta F_i \quad (7)$$

где  $dF_i/dN$  есть производная функции  $F_i(N)$  на отрезке  $N_i$ .

Поскольку рабочий интервал  $N_i$  на кривой  $F_i(N)$  зависит от предыдущих пакетов, то при смене очередности пакетов нагружения рабочий интервал меняется и меняется значение производной, являющейся плотностью вероятности. Если функции. распределения вероятности повреждений заменить прямой линией (см. Рис.1 ) на интервале от 0 до  $N_{0i}$ , то выражение для  $F$  из(7) преобразуется в выражение (8)

$$F = \sum_i \frac{N_i}{N_{0i}} \quad (8)$$

что соответствует *линейному суммированию* повреждений.

На основе уравнений (4) –(6) были проанализированы случаи суммирования повреждений 2-х этапного нагружения в прямом и обратном направлении при различных предположениях о виде функций распределения вероятности повреждений  $F_i(N)$ . Были рассмотрены три случая:

1. Обе функции  $F_1(N)$  и  $F_2(N)$  соответствуют нормальному закону распределения плотности вероятности с математическим ожиданием  $\tilde{N}_1$  и  $\tilde{N}_2$  и среднеквадратичными отклонениями  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  с числом приложенных циклов  $N_1$  и  $N_2$  при напряжениях  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ .

2.  $F_1(N)$  соответствует нормальному закону распределения плотности вероятности с  $\tilde{N}_1$  и  $\Delta_1$ ;  $F_2(N) = N/N_{02}$ , т.е. линейное распределение вероятности повреждений.

3. Обе функции имеют экспоненциальное распределение:

$$F1(N) = 1 - \exp(-N/N01) ; F2(N) = 1 - \exp(-N/N02).$$

Проведенный анализ показывает, что в случае 1 и 3 вероятность повреждений не зависит от выбранного вида функций  $F(N)$  при замене очередности нагрузок, т.е.  $F12 = F21$ . В случае 2 смена очередности нагрузок приводит к разным значениям суммарных повреждений, т.е.  $F12 \neq F21$ .

Можно сделать вывод, что смена очередности нагружений не всегда приводит к разным суммарным повреждениям. В [3, стр.92] имеется высказывание, "что перемешивание ступеней нагружения обычно приводит к правилу линейного суммирования повреждений". Было бы интересным доказать это с помощью аппарата теории вероятности.

#### 4. Связь с существующим подходом

Рассмотрим, как соотносятся предлагаемый подход с суммированием вероятностей повреждений с существующим подходом, основанном на *кривых усталости и линейном суммировании повреждений*. Напомним, что мы не делаем разницы между понятиями *количество повреждений и вероятность повреждений*. Оба этих понятия определяют относительную величину повреждений к предельно допустимой величине, когда происходит разрушение.

В существующем подходе повреждения  $F_i$  от приложенного пакета нагружений есть некий функционал  $\psi$ , зависящий от приложенных напряжений  $\sigma_i$ , количества циклов  $N_i$ , коэффициентов запаса по напряжениям  $n\sigma$  и по количеству циклов  $nN$ , предельного количестве циклов  $No_i$ , приводящего к разрушению:

$$F_i = \psi(No_i, \sigma_i, N_i, n\sigma, nN) \quad (9)$$

Используемые в существующем подходе *кривые усталости* устанавливают взаимосвязь:

$$No_i = \varphi(\sigma_i, n\sigma, nN) \quad (10)$$

или

$$\sigma_i = \varphi(No_i, n\sigma, nN) \quad (11)$$

С учётом (10) повреждения  $F_i$  определяются только двумя параметрами -  $No_i$  и  $N_i$  для каждого пакета нагружения. Используемая далее модель линейного суммирования повреждений согласно (8) устанавливает однозначную связь суммарных повреждений  $F$  с нагружаемыми числами циклов  $N_i$  и через  $No_i$  с напряжениями и коэффициентами запаса.

В предлагаемом подходе функция вероятности повреждений  $F(N)$  есть функция  $N_i$  и  $\sigma_i$ , а параметр  $No_i$  используется как граничное

условие достижения вероятностью повреждений единицы. Существующая *кривая усталости* является необходимым элементом для построения функции вероятности повреждения.

Остаётся вопрос в предлагаемом подходе о используемых в существующем подходе коэффициентов запаса. Если их оставлять при определении граничного условия  $N_{0i}$ , то надо продумать идеологию назначения значений коэффициентов запаса на всём интервале определения функции повреждения  $[0; N_{0i}]$ . Надо ли при расчётах в области нагружений с количеством циклов  $N_i \ll N_{0i}$  иметь такие же запасы, как для  $N_{0i}$ ? Возможно это зависит от того, насколько быстро возрастает функция  $F(N)$  от  $N$  на начальном отрезке. Приведённая на рис.1 гипотетическая кривая 3 с более медленным ростом на начальном этапе даёт основания для снижения запасов, а кривая 4 с более быстрым ростом на начальном этапе требует относиться к снижению запасов более осторожно.

### **5. О погрешностях и неопределённостях**

В работе [4] был поставлен вопрос о погрешностях и неопределённостях важных для безопасности показателей потенциально опасных объектов. Вопросы прочности являются основополагающими для потенциально опасных объектов большинства отраслей. Циклическая прочность как основа для определения ресурса занимает одно из центральных мест в проблеме прочности.

Поскольку термины *погрешность* и *неопределённость* не устоявшиеся, поясним, что будем иметь ввиду [4]. Под *погрешностью*  $\Delta Y$  будем понимать, что интересующее значение параметра  $Y$  может находиться с одинаковой вероятностью в интервале  $[Y_0 - \Delta Y; Y_0 + \Delta Y]$  около найденного расчётным или экспериментальным путём значения  $Y_0$ . Под *неопределённостью* будем понимать, что возможное отклонение  $\Delta Y$  параметра  $Y$  от найденного значения  $Y_0$  зависит от вероятности такого отклонения, т.е. *доверительные интервалы и доверительные вероятности*.

Применительно к нашему рассмотрению проблема погрешностей и неопределённостей может касаться двух аспектов: первый – это корректность использования *линейного суммирования повреждений* и, второй аспект, точность определения основного параметра в существующем подходе  $N_0$  как допустимое количество циклов до разрушения. Относительно первого аспекта можно только ставить вопрос о качественной разнице предлагаемого подхода с функцией вероятности повреждений и с используемым линейным приближением. Здесь

трудно делать какие-либо заключения, так как не известна сама функция повреждений. По второму аспекту, определение предельного значения  $N_0$  и кривой усталости, возможно несколько подходов. В работе [5] был проведён анализ взаимосвязи рассеяния основных механических свойств металла, параметров нагружения и запасов (по прикладываемым напряжениям и циклам) на циклическую прочность и ресурс. Задаваясь определёнными вероятностями отклонений механических свойств металла, на основе универсального уравнения циклической прочности [1] проводились расчёты вероятности отклонений предельных значений  $N_0$ .

Значение параметра  $N_{0i}$  есть результат экспериментальных исследований на образцах. Известно, что любые эксперименты имеют свои погрешности. В данном случае кроме необходимой культуры проведения эксперимента, куда входят адекватные постановка, проведение и обработка результатов, входит ещё одна существенная составляющая, связанная с количеством испытываемых образцов. Объём и время испытания образцов связаны с немалыми затратами. Наблюдаемое отсутствие сильной зависимости результатов от числа испытываемых образцов побуждает к ограничению их количества. В результате получаемая информация статистически не всегда обоснована, о чём неоднократно отмечалось в [2]. Сокращение числа испытываемых образцов лишает информации о так называемых *редких событиях*, которые в значительной степени влияют на неопределённость результатов.

За величину  $N_0$  на основании базового эксперимента согласно рис.2 можно взять величины:  $N_p$  при практически полном разрушении образцов, математическое ожидание  $\tilde{N}$ , количество циклов  $N_{1p}$  при разрушении первого образца. Вариант с  $N_p$  не обсуждается. Использование в качестве  $N_0$  математического ожидания  $\tilde{N}$  для оценки неопределённостей позволяет использовать функцию распределения вероятности на рис.2 с получением обычных для теории вероятности параметров *доверительные интервалы и доверительные вероятности*. Т.е. можно будет говорить, что принятое за  $N_0$  значение  $\tilde{N}$  может отклониться на величину  $\Delta N$  с вероятностью  $P$ , зависящей от  $\Delta N$  и среднеквадратичного отклонения  $\Delta p$  функции  $F_p(N)$ . Для нормального распределения  $F_p(N)$  с помощью интеграла вероятности можно получить значения  $P$  от безразмерной величины  $\Delta N/\Delta$ :

$\Delta N/\Delta$	0	1	2	3	4
P	0,5	0,34	0,023	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$

В случае принятия за показатель разрушения  $N_0$  разрушение одного образца из участвующих в испытаниях по образцов классическое определение вероятности даёт значение  $F(N_1p)=1/n_0$ , где  $n_0$  – количество образцов при испытании. Однако не имеется возможность в результате одного базового эксперимента иметь функцию распределения вероятности разрушения одного образца. Зафиксированное в одной серии эксперимента значение  $N_1p$  есть только одно из множества возможных. Можно представить себе эксперимент из  $m$  групп по  $n$  образцов в каждой. Все образцы прошли одинаковую процедуру отбора. В процессе одинакового нагружения (всех вместе или каждой группы отдельно) в каждой группе разрушение первого образца происходит при своём количестве циклов  $N^m_1p$ . Если разбить ось циклов  $N$  на интервалы  $\Delta N_m$  и подсчитать количество разрушившихся образцов в каждом интервале, то можно построить функцию плотности и распределения вероятности разрушения первого образца  $f_1p(N)$  и  $F_1p(N)$ . Проведение таких экспериментов весьма дорогостоящая задача, так как  $m \sim n$  по и общее количество образцов составит  $n^2$  против  $n$  при базовых испытаниях. Проанализировать рассмотренные выше неопределённости и сделать какие-то выводы можно сделать при наличии конкретных функций распределения вероятности разрушений первого образца.

Существенным при анализе неопределённостей результатов расчёта циклической прочности является количество испытываемых образцов  $n$ .

## 6. Заключение

На основе рассматриваемых функций вероятности повреждений предложен подход к суммированию повреждений при циклических нагрузках, отличающийся от линейного суммирования повреждений. Приведены примеры суммирования повреждений от двух пакетов нагружения в прямом и обратном направлении с разными гипотетическими функциями вероятности повреждений. Разница в суммарных повреждениях при прямом и обратном нагружении зависит от вида обеих функций вероятности повреждений. Рассмотрены подходы к оценке погрешностей и неопределённостей при определении некоторых характеристик циклической прочности.

## ЛИТЕРАТУРА.

1. Н.А. Махутов. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Новосибирск. “Наука”.2005.
2. В.В. Болотин. Ресурс машин и конструкций. Москва. “Машиностроение”. 1990.
3. Дж. Богданов, Ф.Козин. Вероятностные модели накопления повреждений. Издательство “Мир”. 1989.
4. Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Энергоатомиздат. 1989.
5. О.М.Ковалевич. Погрешности и неопределённости при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии. Атомная энергия. Том 106, вып.2, февраль, 2009.
6. Н.А.Махутов, В.В.Зацаринный. Обоснование безопасности по параметрам рассеяния основных механических свойств, нагруженности и запасов прочности. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. №3.2009.

# НОВЫЕ ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ И ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

*Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций  
№ 1, 2011*

## 1. Введение.

Прошедшие за последнее время в техногенной сфере аварии требуют ещё раз задуматься о причинах их возникновения и путях их предотвращения. Не имеет смысла проводить сравнения с прошлыми годами по количеству и тяжести аварий. Они были раньше, есть сейчас и не исключены в будущем. Каждый период времени испытывает характерные условия текущего периода и зависит от условий прошлого. Объекты техногенной сферы имеют долгий жизненный период и являются источниками возможных аварий на протяжении их жизненного цикла. Затрагиваемые ниже *проблемы* не являются абсолютно *новыми*. В новых условиях развития государства и в своей совокупности они создают проблемы, требующие внимания на уровне государства.

В поле зрения находятся последние чрезвычайные события (ЧС) в виде аварии на Саяно-Шушенской ГЭС, случай с Невским экспресом, авария на шахте Распадная, колебания моста через Волгу под Волгоградом. Оговоримся, что включение аварии с Невским экспресом не касается первопричины аварии (терроризм, что не будет предметом нашего рассматривания), а связано с реакцией объекта на чрезвычай-



чайные воздействия (отрыв кресел, явившийся основной причиной гибели людей). Колебания моста через Волгу было предшественником весьма серьёзной аварии.

Имеется несколько углов зрения, под которыми можно анализировать возникшие проблемы безопасности в техногенной сфере. Сейчас мы не будем вдаваться в подробности толкования понятия *объекты техногенной сферы*. Дальнейшее наполнение этого понятия рассматриваемыми техническими проблемами позволит определиться, какие отрасли могут быть включены в это понятие. В настоящее время в отечественной литературе [1] широко используется термин *критически важные объекты (КВО)*, который можно в определённой степени отождествлять с используемым нами понятием *объект техногенной сферы*. В разделе 5 мы коснёмся разъяснений относительно этих понятий.

Рассмотрим некоторые факторы, по которым можно анализировать состояние проблемы с *безопасностью в техногенной сфере* в настоящий момент:

- (1) Изношенность оборудования;
- (2) Кризис;
- (3) Несоблюдение нормативных требований;
- (4) Страхование;
- (5) Недостаточность или избыточность нормативно-правовой и нормативно-технической базы;
- (6) Отсутствие *общей концепции безопасности в техногенной сфере*;
- (7) Погрешности и неопределённости при обосновании безопасности.

Остановимся на каждом из них подробнее.

## **2. Изношенность оборудования и кризис**

Объективным фактором, который нельзя не учитывать, является *изношенность* основных фондов промышленности. Приводимые цифры (60, 70 или 80 процентов) зависят от того, как считать и как это определяет аварийность. При правильном проектировании и надлежащем техническом обслуживании независимо от срока службы до завершения эксплуатации или при продлении срока эксплуатации должна быть подкреплена соответствующими затратами на ремонт, увеличение объёма контроля, модернизацию. Таким образом, аварийность не есть следствие *изношенности*, а следствие не обеспеченности надлежащего технического обслуживания и ремонта, не своевре-

менного вывода из эксплуатации. Отсутствие средств на надлежащее техническое обслуживание и на своевременный вывод из эксплуатации старых объектов с сооружением новых есть результат просчётов при планировании обеспеченности финансового состояния объекта на весь срок жизни и отсутствия забот о восстановлении мощностей. *Неустойчивое развитие государства* из-за внутренних и внешних причин усугубляет ситуацию.

В условиях *кризиса*, мирового и внутригосударственного, появляются внешние по отношению к объекту причины для сокращения необходимых затрат на эксплуатацию, своевременный вывод из эксплуатации, на замещение мощностей. У автора нет прямых известных данных на этот счёт, но можно предположить, что в условиях кризиса, когда обостряется финансовое положение предприятия, стремление сэкономить расходы на эксплуатацию имеют место. Публиковавшиеся материалы по расследованию аварии на СШ ГЭС и на шахте Распадная дают основание предположить это. Поскольку степень защищённости объекта от аварий носит вероятностный характер [2,3], то снижение степени защищённости объекта из-за уменьшения расходов на эксплуатацию проявляется в виде аварии не сразу. Заложенные при проектировании запасы и вероятностный характер дефицита безопасности дают возможность до определённого момента избегать ЧС.

В работе [2] было показано, что сокращение затрат на поддержание эксплуатации объекта на требуемом уровне приводит к появлению дефицитов безопасности с постоянной времени, зависящей от чувствительности объекта к необходимым затратам на поддержание его безопасности и роста дефицита необходимых затратах. При достижении определённого уровня дефицита в необходимых затратах и, следовательно, дефицита безопасности, может произойти (происходит) авария. Задача для каждого объекта состоит в определении того критического уровня дефицита затрат, при котором возможна авария. В работе [3] эта мысль изложена на языке теории вероятности, когда вводятся функции предельных состояний как вектор случайных переменных состояния объекта и внешних нагрузок, а также индекс защищённости системы как отношение разницы математических ожиданий состояния системы и нагрузок к среднеквадратичному отклонению этой разницы. К сожалению, такие математические оценки даже на объектах самых передовых отраслей практически не проводятся и решения руководством объектов принимаются из коммер-

ческих соображений в расчёте на недосмотр органов надзора и на благосклонность случайных величин по теории вероятности (*авось пройдёт.*)

### 3. Несоблюдение нормативных требований

Несоблюдение *установленных требований* можно считать сейчас одной из главных причин возникновения аварий. Существует несколько факторов, порождающих это явление. Сюда входит отсутствие во многих отраслях существующего при использовании атомной энергии понятия *культура безопасности* (т.е. осознание персоналом потенциальной опасности объекта и соответствующее отношение персонала к своим обязанностям) и недостаточный учёт *человеческого фактора*, т.е. возможность человеком принимать неправильные решения или не принимать правильные решения. Если в классическом понимании *человеческого фактора* мотивы действия индивидуума считаются *непреднамеренными*, то в нынешней ситуации они часто принимают *преднамеренный* характер по корыстным мотивам, корпоративным или личным.

Состояние проблемы в нынешних условиях относительно *соблюдения установленных требований* со стороны государственных и частных предприятий затрагивает не только уровень руководства этих предприятий, но и руководство отраслями на государственном и корпоративном уровнях. Эффективность надзорных функций государства и правовая ответственность всех участников играют определяющую роль.

При проектировании и эксплуатации объектов техногенной сферы приходится совмещать выполнение классических требований по безопасности (не причинение вреда человеку и окружающей среде) и надёжной работой объекта по выполнению предназначенной функции, невыполнение которой влечёт за собой значительный ущерб владельцу, потребителю, государству. В какой-то степени эти требования совпадают, но далеко не всегда. Наиболее наглядно это проявляется при эксплуатации, когда стремление выполнить требование заказчика продукции вынуждает операторов объекта выходить за обозначенные рамки безопасной эксплуатации, что является причиной аварий. Чернобыльская авария и авария на СШГЭС являются подтверждением этого [4]. В нынешних условиях рынка государство, приняв Закон №134 [5] ослабило контрольные функции, желая расширить условия для развития бизнеса и производства за счёт блокирования бюрократии и коррупции. В то же время это способствует

бесконтрольному нарушению требований по безопасности, что приводит к тяжёлым авариям с гибелью людей.

При любой аварии может наноситься ущерб как самому владельцу объекта, так и сторонним юридическим и физическим лицам и окружающей среде. Ущерб владельца складывается из ущерба от разрушения объекта или его части, потере доходов от недовыпуска продукции, неустойки за нарушение поставок своей продукции заказчикам, компенсация ущерба пострадавшим лицам. Последнее есть финансовая сторона ответственности за нарушение условий безопасной эксплуатации, приведшее к причинению вреда здоровью людей. Возникает вопрос, как соотноситься для объекта финансовая сторона ответственности за жизни людей к другим составляющим возможного ущерба. На примере аварии на СШГЭС за смерть около 100 человек необходимо было заплатить около 100 миллионов рублей. Эти 100 миллионов рублей эквивалентны стоимости вырабатываемой электроэнергии за 1,7 ч работы станции на полной мощности (при мощности 6 Гвт и отпускной цене 1руб/квт.час), 3,5 ч работы при 50% мощности и т.д. Как видим, возможный ущерб владельцу станции от недовыработки продукции не сравним с возможной финансовой ответственностью за гибель людей. И естественно стремление объекта при нештатных ситуациях выйти из положения с минимальным ущербом. Ситуация могла бы заметно измениться при увеличении расходов на компенсацию ущерба здоровью людей на 1-2 порядка

Государство, приняв Закон №134, обозначило свою неспособность справиться с бюрократией и коррупцией путём жёстких административных и правовых методов. Ограничив государственный надзор и контроль, оно предоставило большую свободу предпринимателям самим определять степень выполнения требований по безопасности. Воздействие на предпринимателей через суд и прокуратуру за выявленные контрольными органами нарушения требований по безопасности есть процесс с большим запаздыванием по времени и в большинстве случаев не эффективен. Поскольку выявленное нарушение ещё не есть авария, это не может не сказаться на решении суда, а предприниматель действует по принципу «авось обойдётся», учитывая соотношения возможных ущербов от недовыработки продукции и компенсации пострадавшим. Таким образом, резко уменьшается в государстве превентивная составляющая обеспечения безопасности.

В случае произошедшей аварии с человеческими жертвами и большим материальным ущербом объекту приходится отвечать как

материально, так и уголовно для сотрудников, чья вина в нарушении установленных правил, норм, стандартов будет доказана. Возможность такого доказательства не всегда очевидна в силу несовершенства официальных нормативных требований и достаточно развитой системой юридической защиты интересов объекта.

Относительная величина компенсации возможного ущерба не всегда является устрашающей для объекта. Ситуация для него упрощается, когда государство приходит на помощь в компенсации ущерба и в восстановлении объекта, т. к. из-за выхода объекта из строя может нарушаться работа существенных для бюджета государства предприятий и отраслей промышленности.

В работе [6] затрагивается вопрос о толковании понятий *контроль и надзор*. Декларируется и обосновывается некоторыми нормативными документами, что *контроль* есть более широкое понятие, чем *надзор*. Вертикаль контроля, присущая, по мнению автора [6], промышленности в виде государственной отрасли или концерну, имея наверху руководящий орган, имеет неограниченную возможность оперативно воздействовать на ниже лежащие уровни при нарушении требований по безопасности, вплоть до прекращения эксплуатации объекта. Вертикаль надзорных органов, связанная Законом №134, не обладает возможностями жёстких оперативных санкций. В этой ситуации, если принять предлагаемое толкование понятий *контроль и надзор*, видится новая возможность организации *надзорно-контрольной деятельности*, объединённой усилиями органов надзора и промышленности. Выявленные органами надзора серьёзные нарушения требований по безопасности, требующие оперативного реагирования, но не санкционируемые Законом №134, передаются верхнему уровню руководства корпорации или концерна для принятия адекватных мер. Ответственность за неадекватные действия при этом ложится на корпорацию или концерн в случае возникновения чрезвычайных ситуаций. Естественно, что подобная идеализированная схема имеет смысл, если верхний уровень *контроля* промышленности действительно будет действительно контролировать низшие уровни, а не поощрять их выполнять коммерческие интересы отрасли за счёт уровня безопасности. Нужны будут соответствующие правовые нормы такого взаимодействия.

#### 4. Страхование

Фактором, влияющим на затрагиваемые при чрезвычайных ситуациях стороны, является система страхования. Различны мотивы

участников в этой системе. Объект заинтересован в страховании для компенсации своего ущерба при аварии с разрушением объекта и осознание возможности и необходимости компенсировать ущерб пострадавшим юридическим и физическим лицам. Государство тем самым освобождается или облегчает свою долю в компенсации ущерба объекту и пострадавшим от аварии. Пострадавшим от аварии физическим лицам гарантируется или облегчается получение компенсации. Страховые компании, организующие весь этот процесс, рассчитывают получить от своей деятельности достаточную прибыль. Поскольку весь процесс организации страхования исходит из концепции риска, т.е. носит вероятностный характер, взаимодействия между участниками носят по законам рынка противоречивый характер и зависят от интересов каждой стороны и способности доказать свои интересы в страховом процессе [7].

При добровольном страховании страховщик сам определяет необходимость и размеры страхования. Мотивация здесь обезопасить себя от возможного ущерба при чрезвычайных ситуациях. Страховая сумма не всегда компенсирует величину всего ущерба, хотя ещё со времён создания страховой компании Ллойда известны случаи сознательного причинения ущерба с целью получения компенсации, превышающую фактическую стоимость. Противоречия между интересами страховщика и страхователя не позволяют системой страхования охватить всю техногенную сферу и государство вынуждено брать на себя значительную долю в затратах на компенсацию ущерба от чрезвычайных ситуаций.

Вводимое государством обязательное страхование в отдельных областях призвано снизить это бремя с государства. Фактически покрытие ущерба при этом происходит за счёт страховщика с добавкой на расходы и прибыль страховых компаний, что не с восторгом встречается страховщиками.

Таким образом, институт страхования в том виде, как он существует сейчас, не является фактором, способным оказать существенное влияние на *безопасность в техногенной сфере*. Необходима существенная реорганизация. Целью такой реорганизации должно быть увеличение финансовой ответственности промышленности за ущерб здоровью людей и за экологическое воздействие.

**5. Недостаточность или избыточность нормативно - правовой и нормативно - технической базы**

Необходимость совершенствования нормативно- правовой и нормативно- технической базы не вызывает сомнения. В работе [1] обсуждаются *проблемы правового обеспечения защищённости критически важных объектов*. Хотя направленность работы отражает озабоченность проблемами МЧС, используемая формулировка заголовка затрагивает более широкие области и требует оценки под разными углами зрения, поскольку нет общепризнанного толкования используемых терминов.

Следует различать *нормативно-правовую и нормативно-техническую базу*. Под первой обычно понимаются законодательные и подзаконные акты, создающие юридическую основу той или иной деятельности, связанной с деятельностью *критически важных объектов или объектов техногенной сферы* в нашем толковании. Под *нормативно-технической документацией* понимают регламентацию научно-технических основ той или иной деятельности и предназначена для регулирования деятельности в научно-техническом плане в конкретной отрасли. Поднятый в [1] вопрос о недостаточности правовой базы необходимо идентифицировать с рассматриваемой автором базой и областью, поскольку в разных аспектах ситуация может быть разной.

Понятие *критически важный объект (КВО)*, приведённое в [1] на основании принятой Правительством «Концепции федеральной системы мониторинга критически важных и (или) потенциально опасных объектов, инфраструктуры Российской Федерации и опасных грузов» [8] толкуется как *объект, нарушение (или прекращение) функционирования которого приводит к потере управления экономической страны, субъекта или административно-территориальной единицы, её необратимому негативному изменению (или разрушению или существенному снижению безопасности населения, проживающего на этих территориях на длительный период времени)*. Как видно, *безопасность* как защита населения и окружающей среды стоит на последнем месте. Данное определение КВО по смыслу часто переносится на определение *безопасность объекта*, что приводит к совершенно другой логике построения *концепции безопасности объекта*.

Используемый термин *защищённость КВО* также требует разъяснений. В его толковании видится отражение задач МЧС РФ по защите населения от *последствий* разрушения КВО по внутренним и внешним причинам. Именно от *последствий*, возникающих при возникновении аварий или чрезвычайных событий на объекте. Именно

такой смысл следует вкладывать в записанное в Положении об МЧС слова ***предупреждение чрезвычайных ситуаций***, а не предупреждение самих чрезвычайных событий на объекте в виде тяжёлых аварий. Трудно себе представить, чтобы МЧС думало о предотвращении неконтролируемого разгона ядерного реактора (Чернобыльская авария) или о предотвращении отрыва гидроагрегата ГЭС (Авария на СШГЭС). Задача МЧС в этих и других случаях – быть готовым к ограничению **последствий** для людей при крупных авариях, с чем они успешно справляются. Предотвращать сами аварии на объектах технологической сферы – это задача промышленности и Ростехнадзора РФ. Исключением для МЧС из этого положения является противопожарная безопасность, где оно призвано контролировать предупреждение возникновения пожаров.

Говоря о недостаточном развитии *нормативно-правовой базы* автор работы [1] вероятно имеет ввиду нормативную базу функционирования системы МЧС, но это далеко не вся нормативная база. Прделанная работа по сравнению нормативно-технической базы в гидроэнергетике и в атомной энергетике показало её недостаточность в первой области по сравнению со второй. Не исключено, что подобная ситуация присуща и другим отраслям. Необходимы соответствующие анализы при наличии некоторого критерия, по которому можно было определять *достаточность или недостаточность*.

В последнее время в отдельных отраслях возникла противоположная проблема – *избыточность* существующей нормативной базы. Возникла она в отрасли достаточно далеко продвинутой в этом отношении – при использовании атомной энергии, но может возникнуть и в других отраслях промышленности. Атомная энергетика испытывает сейчас *ренессанс* в новых условиях развития. Выросший из легендарного Средмаша и Минатома концерн РОСАТОМ и его структурная часть концерн Энергоатом, имея возможность широко развернуть свою деятельность внутри страны и за рубежом, проповедует линию на самостоятельность промышленности в вопросах номенклатуры и разработки нормативно-технической базы. Изменение в подходах к нормативно-технической базе потребует пересмотра нормативно-правовой базы.

## **6. Отсутствие общей концепции безопасности в технологической сфере**

Надёжная и безаварийная работа объекта зависит от того, как спроектирован, сооружён и эксплуатируется объект. Различные от-



расли исторически шли своими путями создания отраслевой концепции безопасности исходя из специфики опасности для человека и окружающей среды со стороны объектов отрасли. Если сравнить отраслевые концепции между собой, то можно констатировать разные подходы к неким основополагающим принципам, т.е. отсутствие общей СИСТЕМЫ, о которой мы упоминали в [4]. Закон «О техническом регулировании» не даёт ответа на вопросы системного научно-технического подхода к созданию общей концепции обеспечения безопасности в техногенной сфере, ограничиваясь введением понятия «степень риска». Вводимое понятие не подкреплено никакими границами допустимости и эффективными методиками [9, 10], поэтому на сегодняшний день оно не работает. Вместе с тем между различными существующими подходами (отраслевыми концепциями безопасности) и проповедуемой концепцией риска [11] может существовать некая *общепромышленная концепция безопасности*, которая на детерминированном научно-техническом уровне могла бы объединить большинство отраслей промышленности, подняв в целом проблему безопасности на более высокий уровень. Попытка сравнить подходы в различных отраслях имеет место после аварии на СШГЭС, когда было предложено сравнить подходы в гидроэнергетике и в атомной энергетике. Прделанная на этот счёт работа показала наличие большого количества пробелов в подходах в гидроэнергетике по сравнению с атомной энергетикой. Вместе с тем национальные подходы в атомной энергетике не покрывают международные требования, обобщённые МАГАТЭ.

Вопрос об *общепромышленной безопасности* по терминологии не новый. Имеется Закон «О промышленной безопасности». Понятие *промышленная безопасность* появилось в обращении с 80-х годов прошлого столетия как совокупность отраслей, подпадающих под сферу деятельности Госгортехнадзора СССР после выделения атомной тематики в отдельное поднадзорное направление. В системе Госгортехнадзора деятельность была главным образом направлена на соблюдение нормативных документов каждой отрасли и формирование общих правовых и организационных процедур проведения надзора. Вопрос о создании общих научно-технических подходов в обеспечении безопасности не рассматривался, за исключением появившейся в последние годы концепции риска. По такой же схеме работает в целом Ростехнадзор, включивший в свою сферу внимания кроме промышленной безопасности также атомную тематику и экологию. Ка-

ждое отраслевое направление функционирует при этом под прикрытием своих законов и своей сложившейся нормативной базе, отражающей свой подход к обеспечению безопасности, т.е. некой *отраслевой концепции безопасности*.

Мы ставим вопрос о создании *общепромышленной концепции безопасности*, в принципе способный распространяться на все отрасли техногенной сферы. Повторим, что сейчас мы умышленно избегаем разъяснения понятия *объекты техногенной сферы*.

*Общепромышленная концепция безопасности (ОКБ)* есть часть более общего понятия *безопасность в техногенной сфере* (БТС), которое определим следующим образом:

*Безопасность в техногенной сфере (БТС)* - совокупность научных, технических и организационных положений, направленных на безопасное функционирование для человека и окружающей среды объектов техногенной сферы.

О том, что *безопасность* это наука, говорилось неоднократно [7,12]. Как всякая наука, БТС не может быть определена какой-либо монографией или закреплена каким-либо официальным документом. Это есть накопленная опытом система взглядов, отражённая в научных доктринах, законодательных актах, нормативных документах, методиках, в культуре безопасности членов общества и т.п. Такая система находится в постоянном развитии в соответствии с развитием общества в его способности адекватно реагировать на изменяющиеся внутренние и внешние условия.

В работе [7] мы определили пять основных частей (основ) понятия БТС:

1. Правовая основа;
2. Научно – техническая основа;
3. Экономическая основа;
4. Управляющая и контролирующая основа;
5. Культура безопасности и человеческий фактор.

Предлагаемая для обсуждения *общая концепция безопасности* есть одна из составляющих *научно-технической основы*, которая по мере своего формирования может найти своё отражение в правовых основах.

В статье [4], где проводилось сравнение Чернобыльской аварии с аварией на С.-Ш. ГЭС, было введено абстрактное понятие *СИСТЕМА* как совокупность узаконенных взглядов на проблему *безопасности в техногенной сфере*, нарушение положений которой

приводит (может привести) к аварии. В дальнейшем под понятием *СИСТЕМА* будем понимать введённое выше понятие *общая концепция безопасности*.

Изложенное ниже является попыткой в первом приближении отразить подход к формированию ОКБ. Представленные соображения были получены при сравнении подходов обеспечения безопасности АЭС и ГЭС. Изложение будем вести в виде декларирования определённых положений или требований с некоторыми пояснениями.

1. Необходимо дать *определение объекта*, отражающее следующие моменты:

- Предназначение в народном хозяйстве; юридический статус (государственный, корпоративный и др.);
- границы или перечень подпадающих под управление объекта сооружений, территорий и т.п.;

2. Необходимо дать определение *безопасность объекта*. Следует исходить от обратного - в чём *опасность объекта*? Для АЭС это облучение населения и окружающей среды, для ГЭС это возможность *затопления* непредусмотренных территорий нижнего бьефа с человеческими жертвами и аналогично для других видов объектов в чём заключается их *опасность*.

Предлагается следующая формулировка:

*Объект считается безопасным, если его сооружение и оборудование обеспечивают безопасность населения и окружающей среды, как во время всего срока эксплуатации, их так и при постулированных нарушениях сооружений и оборудования по внутренним и внешним причинам.*

3. Необходимо дать *критерии*, качественные и(или) количественные, обеспечивающие безопасность населения и окружающей среды.

4. Необходимо определиться с *классификацией* систем, оборудования и сооружений объекта. Все системы объекта необходимо разделить на две основные группы: *системы нормальной эксплуатации* (СНЭ) и *системы безопасности* (СБ). Возможны ситуации, когда одна и та же система по своим функциям может относиться к обеим группам.

5. Под СНЭ понимается всё, что необходимо для нормальной эксплуатации объекта, т.е. для выполнения предназначенных функций.

6. *Нарушение (отказ) СНЭ является причиной (исходным событием) возможных аварий.*

7. Надёжность СНЭ, обеспечение качества изготовления, обслуживание и ремонт есть основные средства предотвращения *аварий* и являются первым эшелоном *принципа многоэшелонированной защиты.*

8. *Под системами безопасности* понимаются системы, предназначенные либо для нейтрализации *нарушений* СНЭ, либо для уменьшения *последствий* развивающейся аварии.

9. СБ при необходимости их действия могут отказать (не выполнить или выполнить в неполном объёме требуемые функции). Поддержание СБ в рабочем состоянии и обеспечение необходимой надёжности их функционирования за счёт *резервирования* является необходимым условием обеспечения безопасности (второй эшелон *многоэшелонированной защиты*).

10. Необходимо определиться с *постулированными нарушениями (исходными событиями)* в СНЭ, для защиты от которых предусматриваются СБ.

Данное понятие является основополагающим при обеспечении безопасности в техногенной сфере. Через него проходит граница *проектных и запроектных аварий (ПА и ЗПА).*

*Проектная авария* есть нарушение (исходное событие) в СНЭ, при котором СБ нейтрализуют нарушение или ослабляют до приемлемого уровня его последствия. Другими словами, ПА есть авария против которой были предусмотрены *защитные меры*, т.е. СБ.

Запроектная авария есть нарушение (исходное событие), против которого в проекте не предусмотрены защитные меры в виде систем безопасности (Отрыв крышки гидроагрегата при аварии на С.-Ш. ГЭС очевидно не входил в класс ПА(!), также не входило в ПА отрыв кресел на Невском экспрессе при резком торможении из-за схода с рельс). Авария может быть *запроектной при постулированных исходных событиях с отказом предусмотренных СБ.*

10. СНЭ делятся на *классы (категории)* в зависимости от степени влияния на безопасность и от возможности обеспечить защиту от их нарушений(отказов) системами безопасности.

11. В зависимости от класса (категории) к системам предъявляются дифференцированные *требования* при изготовлении и контролю во время эксплуатации. Чем выше класс безопасности, тем более жёсткие требования предъявляются (Крепление крышки на гид-

роагрегате С.-Ш. ГЭС должно было обеспечено самыми жёсткими требованиями(!)).

12. Должны быть рассмотрены принимаемые во внимание *запроектные аварии*, для возможного происшествия которых разрабатываются меры по их управлению и предусматриваются меры по защите населения.

13. Граница между ПА и ЗПА устанавливается на основе накопленного опыта работы подобных объектов и опыта работы схожего оборудования на объектах другого вида. Также используются методы анализа риска с учётом возможных вероятностей и последствий.

14. Используются *принцип*” защита в глубину” или *многоэшелонированная защита*. Суть его состоит в реализации подхода в обеспечении безопасности на основе нескольких эшелонов защиты. Первый- предотвращение нарушений СНЭ за счёт качественного изготовления оборудования и сооружений и контроль во время эксплуатации. Второй – наличие СБ для нейтрализации или ослабления нарушений в СНЭ. Третий – запланированные действия при развитии аварии за рамки ПА. Четвёртый – предусмотренные действия по защите персонала и населения при ЗПА.

15. Повышение надёжности СБ кроме качественного изготовления и контроля при эксплуатации достигается за счёт *резервирования* либо отдельных элементов, либо за счёт *резервирования* целых каналов, выполняющих заданную функцию. Концепция *резервирования* строится на *принципе единичного отказа*, заключающегося в выполнении системой предназначенных функций при отказе *любого одного элемента*, входящего в систему или отказе одного из зарезервированных каналов системы.

16. Вводятся *пределы и условия нормальной эксплуатации* (ПУНЭ), определяющие границы допустимых значений параметров и наличие определённых состояний систем для нормальной эксплуатации объекта (При Чернобыльской аварии и при аварии на С.-Ш. ГЭС имело место работа на недопустимых уровнях мощности, т.е. нарушение ПУНЭ). *Защитные системы нормальной эксплуатации*(ЗСНЭ) призваны поддерживать ПУНЭ на требуемом уровне.

17. Вводятся *пределы безопасности* (ПБ) как значения показателей состояния объекта при нарушении ПУНЭ и неэффективного действия ЗСНЭ, при которых происходит срабатывание СБ.

18. Вводится градация всех *происшествий* на объекте, выходящих за состояния нормальной эксплуатации. Создаётся *шкала со-*

*бытий*, характеризующая опасность и последствия произошедших событий. Дается определение понятия *авария* с возможной дифференциацией по последствиям.

19. Создается система сбора и анализа отказов оборудования и систем, используемая для корректирующих мер и для накопления статистических данных при использовании вероятностного анализа безопасности.

20. Определяются специфические требования по следующим направлениям:

- Методика расчёта на прочность оборудования и сооружений;
- Требования к материалам;
- Контроль за изготовлением оборудования;
- Обеспечение качества на всех этапах;
- Сертификация и приёмка оборудования;
- Контроль оборудования и систем во время эксплуатации;
- Требования к персоналу и другие необходимые требования.

Приведённый перечень положений может быть существенно расширен за счёт новых и детализации приведённых положений. При проведении вышеупомянутой работы по сравнению подходов в обеспечении безопасности в атомной энергетике и в гидроэнергетике количество таких положений составило около 80. В случае разработки ОКБ на такой основе номенклатура и количество таких положений должно стать предметом обсуждения специалистов из отраслей, подпадающих под действие ОКБ.

## **7. Погрешности и неопределённости при обосновании безопасности**

Известно, что ни одно из приводимых значений параметров объекта для обоснования безопасности, не может быть абсолютно точным. Это относится как к параметрам, полученным экспериментально, так и расчётным путём. Погрешности и неопределённости, характеризующие уровень наших знаний об объекте, необходимо учитывать в обосновывающих безопасность материалах при сооружении объекта и при его эксплуатации. Этой проблеме не уделялось внимания раньше и не уделяется достаточного внимания сейчас в условиях роста техногенной сферы [13,14]

Имеются две стороны этой проблемы. Во-первых,- желание и умение получать значения показателей погрешностей и неопределённостей важных для безопасности характеристик и параметров состояния объекта. Во-вторых, при наличии показателей и неопреде-

лённостей в характеристиках объекта встаёт вопрос о принятии решений о допустимости или недопустимости их возможных отклонений. Первая сторона проблемы в определённой степени находит отражение в научных изысканиях (расчётных и экспериментальных) по конкретной затрагиваемой научно-технической тематике, но практически не отражается в предоставляемых обосновывающих безопасность материалах. В тех случаях, когда и приводятся информация о погрешностях, она большей частью носит детерминистский характер (абсолютная или относительная погрешность приводимой величины), хотя известно, что неопределённости носят вероятностный характер.

Вторая сторона проблемы носит принципиально новый характер в связи с вероятностным характером значений важных для безопасности характеристик и параметров состояния объекта. Трудности возникнут из-за того, что почти все требования нормативных документов у нас носят детерминированный характер и представление характеристик объекта не в виде определённого числа, а в виде вероятностного распределения с определёнными числовыми характеристиками вызовет трудности при принятии решения контролирующими и надзорными органами. Принятая в настоящее время в технике концепция коэффициентов запаса не снимает проблему, так как всегда остаётся определённая вероятность выхода параметра за допустимое значение при сколь угодно большом коэффициенте запаса. Напомним, что в нынешних условиях имеется тенденция избавляться от излишних запасов. Для демонстрации возникающих проблем приведём некоторые соображения.

Размытость расчётных или экспериментальных значений *важных для безопасности параметров* требует особого рассмотрения при соотношении их с *допустимыми значениями*. Под *допустимыми значениями* будем понимать ограничения, накладываемые на данный параметр нормативными документами или проектными пределами, обеспечивающие состояние объекта и протекание процессов в запланированном режиме.

На рис.1 представлены функции распределения вероятности  $F(X)$  и плотности вероятности  $f(X)$  значений расчётного или экспериментального параметра  $X$ . Пусть  $X_{доп}$  является принятым *допустимым значением* этого параметра, а  $X_0$  его математическое ожидание, полученное в результате расчёта или эксперимента. Поскольку значение  $X$  может быть в принципе любое, возникает вопрос, какова вероятность превышения  $X$  значения  $X_{доп}$ . В табл.1 приведены зави-

симости вероятности  $P$  превышения  $X$  допустимого значения  $X_{доп}$  от безразмерного параметра  $\Delta X/\sigma$ , рассчитанные с помощью интеграла вероятности для нормального распределения, где  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение, и

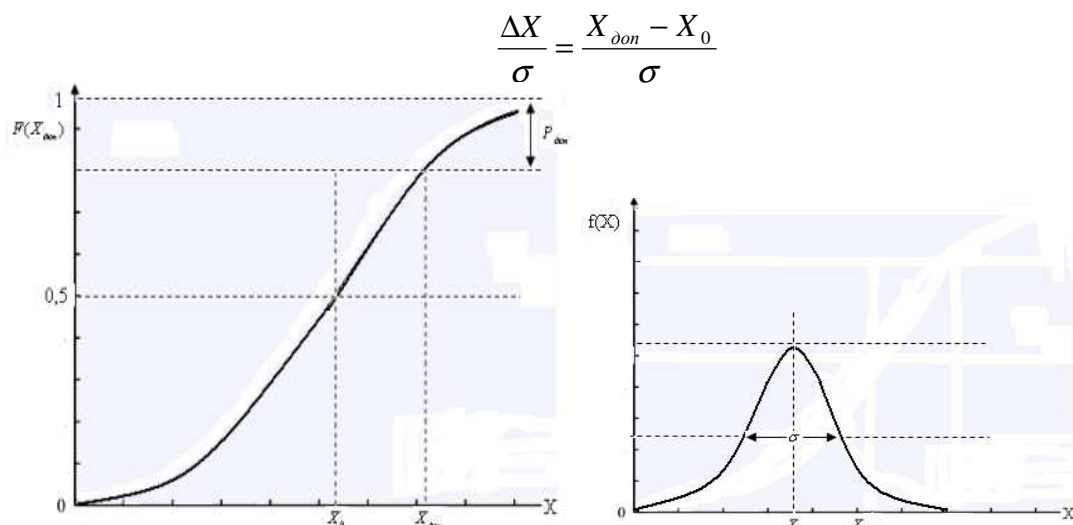


Рис.1. Функции распределения вероятности  $F(X)$  и плотности вероятности  $f(x)$  расчётного параметра  $X$ .

**Таблица 1**

**Вероятность  $P$  отклонения  $X$  от значения  $X_{доп}$**

$\frac{\Delta X}{\sigma}$	0	1	2	3	4
$P$	0,5	0,34	0,023	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$

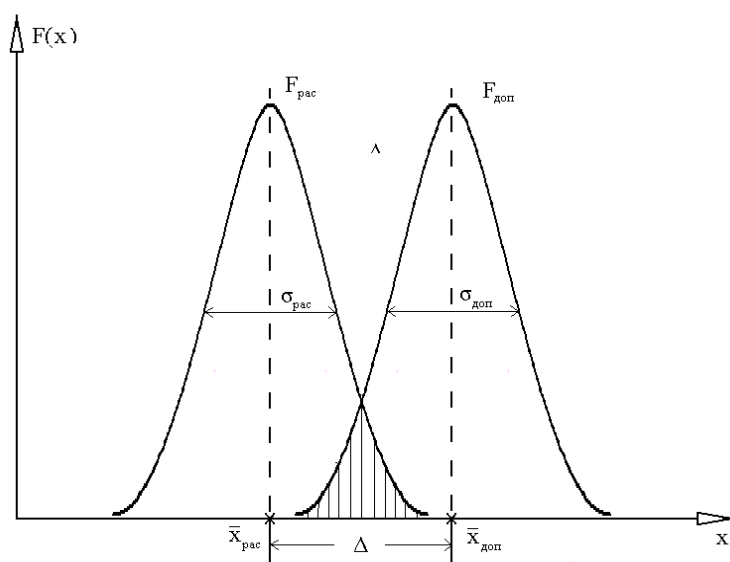
Приведённые цифры говорят, что при равенстве математического ожидания расчётного значения и допустимого значения вероятность превышения параметром допустимого значения составляет 0.5. Достаточно малая вероятность (0.1%) достигается при разнице между допустимым и расчётным значением в 3 среднеквадратичных отклонения  $\sigma$ .

Таким образом, не достаточно для параметра  $X$  обозначить допустимое значение  $X_{доп}$ . Необходимо указать желаемую вероятность не превышения допустимого значения, что совместно с оценённой величиной  $\sigma$  определит необходимый разрыв между расчётным и допустимым значением.

Ситуация усложняется, если допустимое значение не определяется однозначным детерминированным значением, а является размытой величиной с определённой функцией плотности вероятности  $f_{доп}(X)$  (см.рис.2). Кроме случая со свойствами материалов, находящихся в определённых интервалах, подобная ситуация может иметь



место, когда проводятся какие-либо исследования по установлению необходимых проектных пределов состояний объекта, которые также имеют неопределённости. Нормативные допустимые значения, фигурирующие в нормативных документах, в принципе также имеют неопределённость, но вероятно они назначаются с определёнными запасами. Перекрывающиеся области на «хвостах» функций плотности вероятности  $f_{рас}(X)$  и  $f_{доп}(X)$ , как показали расчёты, дают существенную зависимость вероятности  $P$  превышения  $X$  над допустимым значением в зависимости от коэффициента запаса  $\Delta$ , среднеквадратичных отклонений  $\sigma_{рас}$  и  $\sigma_{доп}$ . Это обстоятельство должно иметься ввиду при назначении допустимых значений и при принятии решения.



*Рис.2. Интерференция расчётных и допустимых распределений плотности вероятности.*

В работе [3] было показано, что даже при больших коэффициентах запаса вероятность превышения рассматриваемым параметром допустимых значений может быть больше, чем при меньших значениях коэффициента запаса, но при больших значениях параметра неопределённости  $\sigma$ .

Приведённые в данном разделе соображения требуют разработки и внедрения в деятельность по обоснованию безопасности объектов техногенной сферы нового подхода в методическом и нормативном плане, учитывающем неточность наших знаний о состоянии объекта.

## **8. Заключение**

Проделанный анализ ряда факторов, отражающих новые проблемы безопасности объектов техногенной сферы и возможных чрез-

вычайных ситуаций позволяет сформулировать следующие заключения:

1. Изношенность оборудования и кризис оказывают влияние на состояние с безопасностью на объектах техногенной сферы. Отсутствие доступной информации не позволяет получить определённые количественные показатели. Показано, что сокращение затрат на эксплуатацию и модернизацию приводит к появлению дефицитов безопасности с постоянной времени, зависящей от чувствительности объекта к затратам на поддержание его безопасности и роста дефицита необходимых затрат.

2. Важным фактором, вызывающим опасения за состояние безопасности, является несоблюдение нормативных требований, ставшей причиной последних крупных аварий. Не последней причиной этого является ослабление государственного контроля и надзора в связи с принятием Федерального Закона №134 о защите прав производителей. Рассматривается необходимость повышения ответственности промышленности за нанесения ущерба здоровью населения и окружающей среде. В связи с появившимися новыми толкованиями терминов *контроль и надзор* делаются предложения по объединению усилий в регулировании безопасности надзорными органами и промышленностью.

3. Система страхования в существующем виде не является фактором, способным оказать существенное влияние на безопасность. Необходима реорганизация с целью увеличения финансовой ответственности за ущерб здоровью людей и за экологическое воздействие.

4. В различных отраслях промышленности и на различных уровнях имеются разные соотношения между недостаточностью и избыточностью нормативно-технической и нормативно-правовой документацией. Необходимо проведение анализа по отдельным отраслям при наличии некоторого *критерия*, позволяющего судить о *недостаточности или избыточности*.

5. Предлагается создание *общей концепции безопасности в техногенной сфере*, по положениям которой корректировались существующие подходы обеспечения безопасности в отдельных отраслях. Приводятся основные положения такой концепции, которые могут стать *критерием* при сравнении подходов в разных отраслях.

6. Поднимается вопрос о проблеме *погрешностей и неопределённостей* при обосновании безопасности в техногенной сфере. Об-

суждаются трудности при оценке погрешностей и неопределённостей значений важных для безопасности параметров объекта в связи с их вероятностным характером и детерминированным характером требований в нормативных документах.

### Литература

1. Костров А.В. Проблемы правового обеспечения защищённости критически важных объектов. ПБЧС, №3 2010
2. Ковалевич О.М. Кризис и безопасность в техногенной сфере. ПБЧС, №4 2009.
3. Махутов Н.А., Резников Д.О., Петров В.П., Куксова В.И. Обеспечение защищённости и минимизации общих эксплуатационных затрат и ущербов в течении жизненного цикла критически важных объектов путём выбора оптимальной стратегии проведения технических инспекций и ремонта. ПБЧС, №3 2010.
4. Ковалевич О.М. Чернобыль и Саяно-Шушенская ГЭС: что ведёт к катастрофе? ПроАтом, 12.10.09.
5. Федеральный закон «О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при проведении государственного контроля (надзора)». От 8 августа 2001 года №134.
6. Костров А.В. Проблемы правового обеспечения защищённости критически важных объектов. ПБЧС, №3 2010.
7. Ковалевич О.М. Безопасность в техногенной сфере. В печати. 2010.
8. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.08.2005г. № 1314-р.
9. Ковалевич О.М. А король то голый! (К вопросу о разработке технических регламентов). Ядерная и радиационная безопасность, №4(41), 2006г.
10. Никифоров Н.В. Системные проблемы технического регулирования. Сборник статей. Российский Союз научных и инженерных общественных организаций. Москва-2003.
11. Безопасность России. Анализ рисков и проблем безопасности. 4 тома. М. МГФ «Знание», 2007г.
12. Бурков.М., Грацианский Е.В., Дзюбко С.И., Щепкин А.В. Модели и механизмы управления безопасностью. СИНТЕГ, Москва-2001.
13. Ковалевич О.М., Строганов А.А. Погрешности и неопределённости при обосновании объектов использования атомной энергии. Атомная энергия, том 106 вып.2, февраль-2009.
14. Ковалевич О.М., Румянцев А.Н. Необходимые аспекты решения проблемы погрешностей и неопределённостей. Ядерная и радиационная безопасность, № 4 (54), 2009

## Содержание

Современные задачи вероятностного анализа безопасности объектов использования атомной энергии.....	3
Погрешности и неопределённости при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии.....	19
Кризис и безопасность в техногенной сфере .....	33
Необходимые аспекты решения проблемы погрешностей и неопределённостей .....	47
К вопросу о суммировании повреждений и неопределённостях при циклических нагрузках.....	62
Новые проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций.....	72

**Олег Михайлович Ковалевич**

**Избранные научные труды  
2008-2010**

Подготовка оригинала-макета ОНТИ ФБУ «НТЦ ЯРБ»  
Типография ФБУ «НТЦ ЯРБ»  
Тираж 50 экз.