

**В. И. Борисенко***Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев***О НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ НА АЭС**

Рассмотрены основные причины отличий в наблюдаемых и расчетных частотах аварийных событий в сложных технологических системах, в том числе АЭС. Проанализированы упрощения, заложенные в вероятностную модель работы реакторной установки. Представлены результаты применения степенного распределения вероятностей для оценки последствий катастроф в сложных и опасных технологиях.

*Ключевые слова:* реакторная установка, АЭС, вероятностный анализ безопасности, риск-ориентированный подход, самоорганизованная критичность, степенное распределение вероятностей.

**Новый тип глобальной опасности**

Несмотря на то, что индивидуальный риск погибнуть от последствий аварии на АЭС незначителен (много меньше, чем от любой другой технологии или природных явлений [1]), в общественном сознании сформирована глубокая неприязнь к авариям на АЭС. Это является следствием ряда причин: возможные еще неизученные последствия из-за большой продолжительности радиационного воздействия; «громадный» материальный ущерб от аварий и др. Этим и объясняется, что социально-психологические последствия аварии многократно превосходят ее радиологические и даже экономические последствия.

Широкомасштабное применение ядерных технологий поставило перед человечеством задачи, связанные с чрезвычайной ответственностью за решения и действия и в этой области. Во-первых, с применением ядерных технологий появился новый тип глобальной опасности, с которой вынуждены будут жить многие поколения, даже если придется полностью отказаться от ядерной энергетики (проблема отработанного ядерного топлива (ОЯТ)). Во-вторых, именно идентификация ядерной технологии как наиболее опасной потребовала развития новых моделей и методов оценки ее опасности и возможных последствий от ее применения.

Применение сложных и опасных технологий (авиация, химическая промышленность, ядерная энергетика, ракетно-космическая техника и др.) потребовало разработки новых более совершенных методов анализа и оценки безопасности сложных систем. Вместе с тем на практике наблюдаются значительные различия между наблюдаемыми и расчетными показателями безопасности.

Так, например, в соответствии с расчетами NASA вероятность аварии при запуске Space Shuttle составляет  $10^{-4}$ , наблюдаемая частота аварий  $5 \cdot 10^{-2}$ .

В соответствии с результатами вероятностного анализа безопасности (ВАБ) оцененная частота повреждения активной зоны (ЧААЗ) действующих энергетических реакторов меньше  $10^{-4}$ , а наблюдаемая частота для разных типов реакторов следующая:

РБМК -  $2.0 \cdot 10^{-3}$  (1 авария на ~ 15 реакторах по ~ 30 лет ~ 450 реакторо-лет.);  
BWR -  $1.3 \cdot 10^{-3}$  (3 аварии на ~ 95 реакторов по ~ 25 лет ~ 2500 реакторо-лет);  
PWR -  $1.5 \cdot 10^{-4}$  (1 авария на ~ 260 реакторов по ~ 25 лет ~ 6500 реакторо-лет);  
общая статистика по всем типам реакторов -  $5,0 \cdot 10^{-4}$ .

При таких наблюдаемых показателях безопасности маловероятно, что без существенного повышения безопасности АЭС удастся сформировать общественное мнение о необходимости и целесообразности дальнейшего развития ядерной энергетики.

Одной из основных причин такого несоответствия между наблюдаемыми и расчетными показателями безопасности считается проблема неадекватности применяемых математических моделей сложных объектов, систем их управления и программного обеспечения вероятностных расчетов. Поэтому проблема оптимального управления опасностью в ядерной энергетике все еще является приоритетной и требует рационального решения. На современ-

© В. И. Борисенко, 2012

ном этапе научно-технического прогресса невозможно добиться абсолютной безопасности в любой из сложных современных технологий, поэтому необходимо решить задачу адекватной оценки уже существующей опасности в ядерной энергетике и оптимально ею управлять.

Вопрос об абсолютной безопасности для сколь угодно сложных технических систем обсуждался в технической литературе на начальном этапе внедрения сложных и опасных технологий при условии выполнения технических требований и наличии подготовленного персонала. Однако до настоящего времени добиться абсолютной безопасности не удалось ни в одной технологии. И в соответствии с международными стандартами в области анализа и оценки безопасности безопасность рассматривается как отсутствие неприемлемого риска или как способность объекта выполнять требуемые функции в условиях, предназначенных для его применения, без риска ущерба для здоровья. Соответственно обеспечение безопасности рассматривается в рамках концепции приемлемого риска, а не абсолютной безопасности.

### **Риск-ориентированный подход**

В различных работах широко используются словосочетания - риск-ориентированные подходы, анализ риска, риск аварии и др. В настоящее время оценки рисков от АЭС не являются собственно оценками рисков, потому что потенциальные последствия аварий не оцениваются.

Так, например, в соответствии с [2], риск рассматривается как «вероятность причинения вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений с учетом тяжести этого вреда».

Таким образом, под риском от эксплуатации объекта (технологии) необходимо понимать степень (уровень) ущерба (опасности) от возможных на нем аварий, которая численно равна произведению вероятности события аварии на причиненный аварией ущерб. Т.е. сама вероятность аварии необходима для определения риска, но не позволяет оценить его количественно. В более общем случае, когда возможны различные аварии с разным ущербом, риск определяется как сумма «единичных» рисков.

В ущерб входят различные показатели, которые иногда трудно свести к одному знаменателю, это могут быть количество смертей и пострадавших; нанесенные материальные потери самой установке и окружающей среде. Наиболее трудно поддаются учету последствия в окружающей среде. Тем не менее без такого учета говорить об оценке риска от той или иной технологии некорректно. Хотя интуитивно понятно, что риск от использования опасной технологии (химическое предприятие, АЭС и др.) в густонаселенном районе будет намного выше, чем в «пустынной» местности.

Для получения интегральных оценок ущерба, например, в американских методиках по оценке риска жертвы «относят» к экономическому ущербу, при этом человеческая жизнь оценивается в ~ 400 тыс. долл. Эта цифра получается как усредненная величина вклада «среднего» жителя в ВВП страны за «среднее» трудоспособное время. Для стран с различным экономическим уровнем развития эта цифра будет существенно отличаться.

### **Анализ безопасности реакторных установок. Показатели безопасности.**

Рассмотрим, на примере АЭС, некоторые вопросы оценки безопасности в ядерной энергетике, учитывая также, что значительная опасность присуща и другим звеньям ядерно-энергетической технологии:

- добыча и обогащения ядерного топлива;
- временное хранение, переработка и/или захоронение ОЯТ и высокоактивных радиоактивных отходов.

Также необходимо учитывать, что при решении задач безопасности часто сталкиваются с парадоксом планировщика, когда выбранная стратегия может быть оптимальной в

5-10-летней перспективе, удовлетворительной на время до 20 - 30 лет, и неприемлемой при более длительных сроках (например, проблемы ОЯТ).

С самого начала использование ядерной технологии признавалось крайне опасным и вопросам обеспечения безопасности уделяется первостепенное значение. Несмотря на это начальный этап развития ядерной технологии отличился целым рядом крупных аварий на промышленных реакторных установках, а также в еще большем количестве на транспортных и исследовательских реакторах. Общее количество аварий, приведших к разрушению активной зоны и/или расплавлению топлива, исчисляется десятками [3].

Если проводить аналогии с показателями надежности «простых» систем, то можно условно принять, что на начальном и завершающем этапах эксплуатации реакторной установки значение показателя  $\lambda$  - интенсивность отказов (аварий) - «существенно» выше, чем в установившемся режиме работы реакторной установки (известная U-образная зависимость). Все крупные аварии на энергетических реакторных установках произошли либо в первые 1 - 3 года с начала эксплуатации (ТМІ, ЧАЭС), либо на этапе продления эксплуатации после 30 - 40 лет работы (Fukushima Daiichi - 1, 2, 3). Причинами этого являются дефекты оборудования на этапе приработки в начальный период, «скрытые» проектные ошибки и недостаточная квалификация персонала, а на этапе продления эксплуатации – исчерпание ресурса и устаревшие проектно-технические решения.

После Чернобыльской аварии до 2011 г. крупных аварий на АЭС удалось избежать, что является следствием многих причин. Это уроки тяжелых аварий (ТМІ, ЧАЭС), а также немаловажен и тот факт, что количество вводимых энергоблоков в мире значительно сократилось с более чем 30 энергоблоков в год в дочернобыльский период до 1 - 5 в последние десятилетия. Надо отметить, что в последнее время ежегодно продлевается эксплуатация порядка 20 энергоблоков, что также, как ожидается, может «ухудшить» показатели по  $\lambda$ .

После аварии на Fukushima Daiichi следует ожидать ужесточения требований по безопасности АЭС во всем мире, что, как ожидается, снизит уровень аварийности, как это уже наблюдалось в других технологиях (химия, транспорт). В 2011 г., несмотря на аварию на Fukushima Daiichi, в эксплуатацию введено 7 новых энергоблоков в мире – это рекордное количество с 1994 г. Три блока были пущены в Китае, по одному - в Индии, Пакистане, Иране и России.

В настоящее время строятся более 60 новых энергоблоков в основном в странах юго-восточной Азии, не имеющих необходимого опыта эксплуатации и квалифицированного персонала. Особое место в Китае и Индии отводится технологии использования реакторов на быстрых нейтронах (БН). Необходимо отметить, что более технологически развитые страны (США, Франция, Япония) в настоящее время не эксплуатируют или закрыли свои проекты на реакторах БН. В России с 1979 г. эксплуатируется один несерийный блок БН-600, второй блок БН-800 строится с 1983 г. и планируется к пуску в 2013 г.

Можно ожидать, что широкое внедрение новых технологий по использованию реакторов на БН в странах с традиционно передовыми технологиями приведет к росту показателя  $\lambda$  - интенсивности аварий, который уже наблюдался на начальном этапе в ядерной энергетике на тепловых нейтронах.

### **Вероятностный анализ безопасности**

Современными нормативными документами [4] для обоснования безопасности АЭС требуется и проведение ВАБ. Впервые в 1962 г. элементы ВАБ для анализа безопасности сложных объектов были применены в военно-космической технологии США после ряда аварий на межконтинентальных баллистических ракетах. В 1977 г. под руководством профессора Н. Рассмусена в массачусетском институте технологий была завершена разработка документа «WASH-1400. Анализ безопасности реактора» [5], который стал основой дальнейшего развития и применения ВАБ для анализа безопасности АЭС.

Методология ВАБ явилась очередным шагом в развитии методов, применяемых для выявления возможных отказов сложной системы и количественной оценки возможности аварии. Наиболее распространенными методами для проведения такого анализа являются:

анализ видов и последствий отказов (FME(C)A - Failure Modes and Effects (Critical) Analysis);

анализ дерева отказов (FTA - Fault Tree Analysis);

исследование опасности и работоспособности (HAZOP- HAZARD & OPERABILITY STUDY );

анализ структурной схемы надежности (RBD - Reliability Block Diagram).

Основу метода ВАБ составляет вероятностная модель работы объекта, которая включает деревья событий (ДС), приводящих к аварии на объекте и деревья отказов (ДО), приводящих к отказам отдельных подсистем объекта.

ДС – логическая диаграмма на системном уровне детализации, которая на индуктивной основе описывает возможные сценарии развития аварии на объекте в зависимости от комбинации отказов систем (оборудования) и ошибок персонала.

ДО – логическая диаграмма, отображающая минимальный набор параллельных и/или последовательных комбинации отказов элементов и ошибок персонала, приводящих к возникновению заранее определенного нежелательного события (например, к отказу системы или ее отдельного канала).

Вероятностная модель работы объекта подразумевает знание всех межсистемных связей и зависимостей в различных режимах работы объекта. Однако на практике часто такое знание заменяется недоказанным предположением либо о полной независимости всех подсистем, либо полной зависимостью отказов в подсистемах (отказы по общим причинам).

Другим недостатком вероятностной модели является применения только последовательной во времени связи в ДС между системами и действиями оператора, что является упрощением реальной технологической схемы, в которой системы «связаны», в том числе и параллельно, а также обязательно имеется обратная связь либо через автоматические системы управления, либо через оператора.

Велико влияние и других допущений, принятых в вероятностной модели работы реакторной установки: отказы оборудования происходят с постоянной частотой – не подвержено старению; частоты ошибок оператора получены не в реальных экстремальных условиях и др.

Вместе с тем даже с принятыми упрощениями количество ветвей ДС, которые могут приводить к аварии, очень велико. Их количество равно  $2^n$ , где  $n$  – число систем и действий оператора, входящих в ДС для рассматриваемого исходного события аварии (ИСА). Таким образом, для такого сложного объекта как реакторная установка для отдельных ИСА количество ветвей в ДС может превышать 1000 [6]. Проанализировать все ветви не представляется возможным ввиду ограниченности как в ресурсах, так и во времени. Поэтому ДС группируют и упрощают, исключая из дальнейшего анализа те ветви, которые, по мнению эксперта-технолога, не приведут к аварии или маловероятны. Такое упрощение приводит к тому, что даже высококвалифицированная группа специалистов, технологов и ученых, которая разрабатывала WASH-1400, не включила в анализ маловероятное сочетание событий и отказов в PWR, которые случились в 1979 г. на ТМІ. Такая тенденция сохраняется – уже произошли аварии, вызванные таким сочетанием событий и отказов, которые при предварительном рассмотрении исключались из анализа как маловероятные.

Таким образом, указанные упрощения и предположения о вероятностной модели объекта не позволяют гарантировать получения достоверных значений оцененной ЧПАЗ. Выше приводились данные о существенном различии в оцененной ЧПАЗ по результатам ВАБ и реально наблюдаемой на практике.

### **Связь анализа надежности и оценки безопасности**

Традиционно анализ безопасности базируется на положениях и математике классической теории надежности. В теории надежности определяется ряд показателей: наработка на

отказ, среднее время между отказами, интенсивность отказов и др. Практически это предусматривает, что для проведения оценок по надежности (безопасности) большинства опасных технологий необходимо определить относительные частоты нежелательных событий (отказов, аварий) при длительных испытаниях. В случае же анализа аварий на АЭС нельзя корректно определить относительные частоты возникновения аварий, а можно говорить только о «редких событиях», к которым классический вероятностный подход, основанный на статистических выводах, не может быть применен [7].

Так, например, такой нормативный показатель, как оцененная частота повреждения активной зоны  $\lambda = 10^{-4} - 10^{-5}$  1/год [3], ничего не говорит о случайном времени наступления аварии, которое может произойти в любой год эксплуатации ядерного реактора. А определенное по показателю  $\lambda$  время жизни объекта составляет более  $10^4$  лет, что не соответствует наблюдаемому на практике.

Например, среднее время до аварии для действующих энергоблоков АЭС в мире, в соответствии с [8], можно оценить по формуле

$$T_0(t) \approx \frac{\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n + (N - n)t}{N},$$

где,  $\tau_i$  – время до аварии на  $i$ -м энергоблоке;  $n$  – количество энергоблоков, на которых произошла авария,  $N$  – общее количество энергоблоков.

На 2011 г. получаем  $T_0(t) = 39,8$  лет.

При расчете принято упрощение, что все блоки начали эксплуатироваться одновременно 40 лет назад, а время вывода из эксплуатации энергоблоков после аварии взято для следующих остановленных после аварии энергоблоков АЭС:

ТМ-2 27.03.1979 г. - 2 года после начала эксплуатации;

ЧАЭС-4 26.04.1986 г. - 2 года после начала эксплуатации;

Fukushima-1 12.03.2011 г. - 40 лет после начала эксплуатации;

Fukushima-2 13.03.2011 г. - 37 лет после начала эксплуатации;

Fukushima-3 13.03.2011 г. - 35 лет после начала эксплуатации;

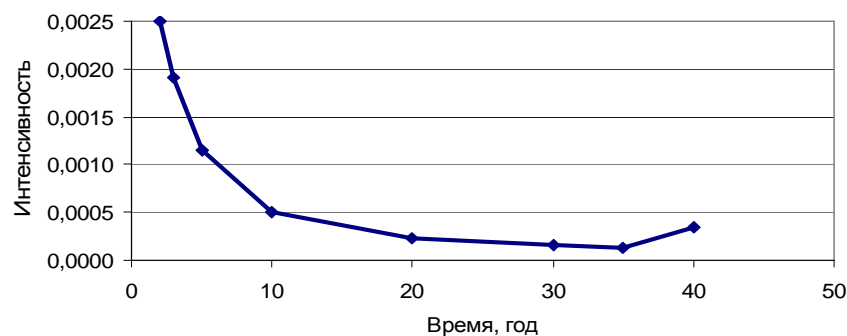
Fukushima-4 14.03.2011 г. - 33 года после начала эксплуатации (на момент аварии 4-й блок находился в ремонте и топливо из реактора было выгружено в бассейн выдержки (БВ), на момент подготовки статьи нет подтвержденных данных о повреждении топлива в БВ 4-го блока).

Наблюдаемая интенсивность аварий определяется по формуле

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{\Delta t \cdot n(t)},$$

где  $\Delta n$  – число аварий на участке  $\Delta t$ ;  $n(t)$  – количество не отказавших энергоблоков на момент времени  $t$ .

Для рассматриваемых в предыдущем примере аварий получаем прообраз «известной» U-образной зависимости (рисунок), в соответствии с которой на 2011 г. среднее время жизни энергоблока составляет 2900 лет, а минимальное нормативно установленное [3] 10000 лет.



Изменение показателя интенсивности аварий  $\lambda$  во времени.

## Оценка ущерба от аварий

Результаты применяемых методов вероятностного анализа безопасности АЭС не позволяют получить данные согласующиеся с практикой. Рассмотрим один из подходов, в попытке ответить на вопрос: существуют ли объективные закономерности в описании последствий крупных аварий и катастроф в техносфере и в природе.

В XIX в. Карл Гаусс установил, что вероятность распределения случайных величин различной природы описывается одинаковой математической зависимостью – так называемое распределение Гаусса. Значения плотности вероятности распределения Гаусса показывают, что большие отклонения от средних величин редки и ими можно пренебречь. Так, например, для нормально распределенной случайной величины справедливо, что не менее чем с 99,7 %-ной достоверностью значения такой случайной величины лежат в диапазоне  $[x + 3\sigma, x - 3\sigma]$ , где  $x$  – математическое ожидание случайной величины,  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение.

Однако анализ статистических данных различных катастрофических событий показывает, что:

крупные катастрофы происходят гораздо чаще, чем можно было ожидать, исходя из распределения Гаусса;

некоторые характеристики природных катастроф (в том числе и последствия) хорошо описываются степенным вероятностным распределением, для которого, в отличие от распределения Гаусса, уже нельзя пренебречь событиями, вероятность которых лежит на краях степенного распределения, так называемые распределения с тяжелыми хвостами [9].

Можно предположить, что распределения с тяжелыми хвостами характерны не только для ущерба от природных катастроф, но также и для ущерба от техногенных катастроф: аварий на АЭС; аварий танкеров и нефтяных платформ; аварий на химических предприятиях, пожаров, разрушений нефтепроводов, аварий глобальных компьютерных сетей и т.п.

Аварии на АЭС, подводных лодках, ракетной технике, самолетах показали, что речь идет не о случайном совпадении отказов, а о некотором общем свойстве сложных систем, которое начинает проявляться, если превышен некоторый критический уровень сложности.

Несмотря на то, что техногенные риски более управляемы, вследствие процесса старения основного оборудования и снижения уровня подготовки персонала можно ожидать увеличения частоты аварий и катастроф на потенциально опасных объектах.

В настоящее время известно, что многие техногенные аварии и природные катастрофы носят системный характер – крупное катастрофическое событие происходит не из-за неблагоприятного стечения обстоятельств, а в силу присущей сложным системам склонности к катастрофическому поведению. Некоторые математические закономерности таких катастроф описываются степенными законами распределения вероятностей. Конкретные процессы, приводящие к степенным распределениям, могут быть весьма разнообразны, в зависимости от соотношений ролей этих процессов и явлений самоорганизации.

В технической литературе много внимания уделяется поиску и определению универсальных сценариев опасного катастрофического поведения систем и объектов различного происхождения (техносфера, природные стихии). Наибольшее распространение получило явление самоорганизованной критичности, применяемой для изучения природных стихий (наводнений, ураганов, землетрясений, торнадо, снежных лавин и др.); для исследований кризисов в экономике и других сферах человеческой деятельности; в техносфере (аварии и катастрофы на транспорте), в химической промышленности и других опасных технологиях.

В сложных объектах, имеющих несколько уровней организации, есть место как для случайных процессов, так и для детерминистских. В некоторых состояниях системы случайные воздействия не приводят к кризисным явлениям, в других они могут вызвать аварийный процесс – катастрофу. В одних состояниях система полностью предсказуема и имеет большой горизонт прогноза, а в других – возможности прогноза невелики. Примером являются системы, обладающие самоорганизованной критичностью. Таким образом, будет рационален

переход от вероятностного к детерминированно-вероятностному описанию опасных процессов в таких сложных системах.

### Степенное распределение вероятностей

Рассмотрим простое распределение, имеющее «тяжелый хвост» - распределение Парето [9]. Функция распределения  $F(x) = \text{Prob}\{\xi < x\}$ , определяющая вероятность того, что соответствующая случайная величина принимает значение, меньшее  $x$ , задается соотношением

$$F(x) = \begin{cases} 1 - x^{-\alpha}; & x \geq 1 \\ 0; & x < 1 \end{cases}, \quad \alpha \geq 1. \quad (1)$$

Соответственно плотность вероятности

$$\varphi(x) = F'(x) \sim x^{-(1+\alpha)}. \quad (2)$$

Особенность таких распределений, состоит в том, что моменты достаточно высокого порядка у них расходятся. Для распределения Парето с  $\alpha \leq 1$  бесконечно уже среднее  $M_1 = \infty$ . Таким образом, решающую роль в распределении играет только асимптотика «хвоста», значительно перевешивающая его «голову», в которую попадают наиболее частые, но несущественные события.

В работе [9] рассмотрена методика получения важных характеристик степенных распределений, которые применяются для анализа последствий различных природных и техногенных катастроф. Некоторые характеристики приведены ниже:

суммарный ущерб от всех катастроф  $S_n$  и максимальный ущерб в одном событии  $m_n$  связаны соотношением

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S_n}{m_n} = \frac{1}{1-\alpha};$$

предварительная оценка параметра  $\alpha$

$$\bar{\alpha} = \left[ \frac{1}{n} \sum \ln \left( \frac{x_i}{x_0} \right) \right]^{-1}, \quad \text{где } x_0 - \text{минимальное пороговое значение распределения Парето};$$

при хорошей статистике аварий (порядка 10 - 20) можно оценить также и период повторяемости крупных аварий.

Так, например, вероятность того, что в природной катастрофе в США погибнет более  $x$  человек, описывается зависимостью  $P(x) = x^{-\alpha}$ , где  $\alpha$  равно: 0,5 - для ураганов; 1,4 - для наводнений; 0,4 - для землетрясений; 1,5 - для торнадо.

Аналогичным степенным зависимостям подчиняются потери от природных катастроф в различных частях планеты

Весьма показательными являются примеры природных катастроф, имевших место за последние 100 лет, в которых число погибших в десятки тысяч раз превосходит число погибших при «средней» природной катастрофе.

Землетрясение:	Тянь-Шань, 1976 г.	- погибло более 500 тыс.чел.;
	Гаити, 2010 г.	- погибло 222 тыс. человек.
Наводнение:	Китай, 1931 г.	- погибло около 1,3 млн. чел.;
	Бангладеш, 1970 г.	- погибло более 500 тыс. чел.
Цунами:	Индийский океан, 2004 г.	- погибло более 220 тыс.чел.

Гигантские экстраординарные значения наблюдаются и для стоимостных характеристик ущерба, особенно за последние годы: разлив нефти в мексиканском заливе, 2010 г. – 20 млрд \$; наводнение в Австралии, 2011 г. – 10 млрд \$; землетрясение в Чили, 2010 г. – 8 млрд \$; засуха, пожары в России, 2010 г. – 2 млрд \$.

Стоимостные характеристики ущерба характерны для более экономически развитых стран, а для развивающихся стран характерны экстраординарные значения людских потерь.

Надо отметить, что перечисленные катастрофы не являются предельно возможными. В летописных источниках описываются еще более разрушительные катастрофы.

Можно заметить, что величина ущерба от катастроф иногда принимает *суперэкстремальные значения*, значительно превосходящие по величине значения для подавляющей части событий. Нанесенный ущерб от этих суперкатастроф сравним с *суммарным ущербом* от всех катастроф за анализируемый период времени. Такая же закономерность наблюдается и для техногенных катастроф: авария на ЧАЭС – потери более 600 млрд \$, авария на АЭС Fukushima Daiichi – уже более 100 млрд \$ (прогнозируемые затраты на первые 10 лет ликвидации последствий аварии – более 200 млрд \$).

Рассмотрим примеры получения характеристик степенного распределения потерь для некоторых технологий: авиакатастрофы, аварии на химических предприятиях, аварии на АЭС.

**Авиакатастрофы.** Рассматриваемый период с 1974 по 2009 г включительно. В анализе рассматриваются все авиакатастрофы, в которых погибло более 100 человек.

Число аварий	39	36	30	27	24	19	13	9	5	2	1
Погибло более человек	100	110	120	130	140	150	200	250	300	400	500

Показатель степенного распределения для оценки потерь при авиакатастрофах  $\alpha \approx 2$ . Таким образом, для распределения могут быть определены математическое ожидание и дисперсия. Как и следовало ожидать значительных отклонений от среднего числа погибших в авиакатастрофе не наблюдается. Максимальные потери ограничены количеством пассажиров в самолете. При дальнейшем увеличении количества самолетов большей вместимости, например, А-380 (~800 пассажиров) нельзя ожидать существенного изменения характеристик степенной зависимости.

**Аварии на химических предприятиях.** Данные взяты из работы [10].

Число аварий	18	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Погибло более человек	5	7	9	10	12	13	22	26	55	70	90	100	130	200	300	706	10000

Показатель степенного распределения для оценки количества пострадавших и жертв при авариях на химических предприятиях  $\alpha \approx 0,5$ . Таким образом, для такого распределения не могут быть определены ни математическое ожидание, ни дисперсия. В данном случае возможны значительные отклонения от наблюдаемого среднего числа погибших при авариях на химических предприятиях. Характерные примеры аварии в Сивезо (Италия, 1976 г.) и Бхопал (Индия, 1984 г.).

После крупных аварий существенно ужесточаются требования по безопасности опасных объектов. Так например, принятие странами ЕС основных положений «Директивы Сивезо» позволило снизить уровень аварийности в развитых странах примерно в 5 раз - от 400 аварий, в том числе 75 крупных (1983 г.), до 70, в том числе 21 крупная (1989 г.).

**Аварии на АЭС.** Аварии на АЭС характеризуются «малыми» людскими потерями и значительным материальным ущербом. Несмотря на то, что в разных источниках данные по материальному ущербу от аварий на АЭС существенно отличаются, тем не менее, для получения предварительных оценок достаточно даже информации об уровне аварии в соответствии со шкалой ИНЕС [11]. В рассмотрении были приняты следующие аварии на объектах ядерного комплекса, которые по шкале ИНЕС относятся к классу аварий, а именно приводят к радиационным последствиям вне площадки.



Применяя математический аппарат анализа степенного распределения вероятностей для данных таблицы получаем:

минимальное пороговое значение распределения Парето  $x_0 = 1$  млрд \$;

предварительная оценка параметра  $\alpha = 0,25$ ;

наилучшая оценка  $\alpha = 0,4$ ;

период повторяемости крупной аварии (при сроке наблюдений 40 лет) составляет от 23 до 100 лет при вариации  $\alpha$  на величину стандартного отклонения.

#### Некоторые характеристики аварий на ядерных объектах

Название объекта	Год аварии	Уровень по шкале ИНЕС	Потери, млрд \$	Вероятность
ЧАЭС-4	1986	7	600	$1,29 \cdot 10^{-4}$
Fukushima-1, 2, 3	2011	7	100	$1,58 \cdot 10^{-3}$
Кыштым	1957	6	50	$4,18 \cdot 10^{-3}$
TMI-2	1979	5	20	$1,51 \cdot 10^{-2}$
Windscale	1957	5	10	$3,98 \cdot 10^{-2}$
Bohunice	1977	4	2	1,00

Получение параметров степенной зависимости для оценки величины ущерба от аварии на АЭС позволяет непосредственно оценить вероятность нанесения ущерба от аварий разного класса в соответствии с формулой (2).

#### Заключение

Таким образом, применение методологии определения параметров степенного распределения для оценки величины ущерба от возможных аварий на АЭС позволяет спрогнозировать возможный ущерб, а также оценить частотные характеристики аварий различного класса. Такая оценка может быть рекомендована для обоснованного выбора страховых взносов операторов АЭС в ядерный страховой пул; служить нижней границей для обоснованного выбора величины ЧПАЗ в нормативных документах по безопасности на АЭС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бойко В. И., Кошелев Ф. П.* Что необходимо знать каждому человеку о радиации. Томск. Изд-во ТПУ. 1993. – 51 с.
2. *Федеральный закон РФ «О техническом регулировании»*, 2008.
3. *Балаганский И.А.* Природные и техногенные катастрофы. Учебное пособие. Новосибирский ГТУ. 2003. – 55 с.
4. *Загальні положення безпеки атомних станцій.* НП 306.2.141-2008.
5. *WASH-1400 (NUREG 75/014) Reactor Safety Study.* US Nuclear Regulatory Commission, 1975.
6. *Rampuro V.I., Borisenko V.I.* "Management of Individual Ecological Safety of Potentially Hazardous Object". – The third American Nuclear International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technologies (NPIC & HMIT 2000), November 13-17, 2000. Washington, D.C. p.707-722.
7. *Хенли Э.Д., Кумамото Х.* Надежность технических систем и оценка риска. - М.: Машиностроение, 1984. - 528 с.
8. *Ветошкин А.Г., Марунин В.И.* Надежность и безопасность технических систем. Учебное пособие – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002. - 129 с.
9. *Владимиров В.А., Воробьев Ю.Л., Малинецкий Г.Г., и др.* Управление риском. Риск, устойчивое развитие, синергетика. – М.: Наука, 2000. – 432 с.
10. *Токарев Д.В.* Оценка вероятности возникновения аварий на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических предприятиях. Нефтегазовое дело, 2005.
11. *ИНЕС.* Руководство для пользователей международной шкалы ядерных и радиологических событий. МАГАТЭ. 2010. – 250 с.

**В. І. Борисенко**

**ПРО ДЕЯКІ ЗАКОНОМІРНОСТІ НАСЛІДКІВ АВАРІЙ НА АЕС**

Розглянуто основні причини відмінностей в спостережуваних і розрахункових частотах аварійних подій в складних технологічних системах, в тому числі АЕС. Проаналізовано спрощення, закладені в імовірнісну модель роботи реакторної установки. Представлені результати застосування ступеневого розподілу ймовірностей для оцінки наслідків катастроф в складних і небезпечних технологіях.

*Ключові слова:* реакторна установка, атомна електрична станція, імовірнісний аналіз безпеки, ризик-орієнтований підхід, самоорганізована критичність, ступеневий розподіл ймовірностей.

**V. I. Borysenko**

**ABOUT SOME REGULARITIES OF CONSEQUENCES OF ACCIDENTS AT NPP**

In the article are considered the principal reasons of differences in observed and calculation frequencies of emergency events in complex technological systems, including NPP. Analyzed simplification inherent in the probabilistic model of work of the reactor. The results of application of power-law probability distribution are presented for the estimation of consequences of catastrophes in complex and dangerous technologies.

*Keywords:* reactor unit, nuclear power plant, probabilistic safety analysis, risk-oriented approach, self-organized criticality, power-law probability distribution.

Поступила в редакцію 01.11.11