

A. V. Calabourdin, P. V. Radchenko

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

a.calabourdin@gmail.com

ПРОБЛЕМЫ ТРАДИЦИОННЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

В данной работе приведена попытка показать фундаментальную ограниченность методов анализа безопасности АЭС как сложной системы. В частности, описана несостоятельность вероятностно-статистического подхода в условиях, где возможны редкие труднопрогнозируемые события со значительными последствиями. В качестве альтернативы предложен подход на основе оценки хрупкости системы.

Ключевые слова: *безопасность; надёжность; АЭС; вероятностный анализ безопасности; ВАБ; нормальное распределение; распределение Гаусса; сложная система; теория катастроф; теория “чёрного лебедя”; хрупкость.*

A. V. Calaborudin, R. V. Radchenko

Ural Federal University, Ekaterinburg

PROBLEMS OF TRADITIONAL METHODS OF SAFETY ANALYSIS FOR NUCLEAR POWER PLANTS

This paper attempts to provide a comprehensive review and critique of the traditional methods for safety assessment of nuclear power plant as a complex system. Particularly, the unapplicability of probabilistic-statistical approach is described for conditions where rare and hard-to-predict events (“Black Swans”) are potential. An approach based on assessment of system’s fragility is proposed as an alternative.

Key words: *safety; reliability; NPP; probabilistic safety assessment; PSA; normal distribution; Gauss distribution; complex system; catastrophe theory; Black Swan theory; fragility.*

АЭС относится к классу сложных человеко-машинных систем и является объектом высокой опасности, рассчитанным на долгие годы

эксплуатации. Поэтому в процессе проектирования, строительства и эксплуатации АЭС прикладываются огромные усилия, чтобы обеспечить соответствие атомных электростанций действующим очень жёстким международным нормам. В соответствии с этими нормами вероятность тяжёлого повреждения активной зоны ЯР не должна превышать величины $1 \cdot 10^{-5}$ на реактор в год (т. е. раз в 100 тыс. лет), вероятность выхода радиоактивных веществ за пределы герметичной оболочки – $1 \cdot 10^{-7}$ (т. е. раз в 10 000 тыс. лет). Разрешение на строительство АЭС даётся только в случае, если её безопасность обоснована [1].

Для обоснования безопасности АЭС традиционно используются методы анализа, основанные на статистике и вероятностном подходе, в частности, вероятностный анализ безопасности (ВАБ) [1]. Однако проблема состоит в том, что целесообразность и допустимость применения таких методов оказываются ограниченными при анализе сложных систем, имеющих потенциал для катастрофических последствий мирового масштаба (таких как АЭС, в частности, при запроектной аварии). Это было детально описано в теории “чёрного лебедя” Н. Талебом (*Теория “чёрного лебедя” – теория, рассматривающая труднопрогнозируемые и редкие события, которые имеют значительные последствия; такие события называются “чёрными лебедями”*) [2].

В частности, традиционно для вероятностного анализа применяется распределение Гаусса, экспоненциальное и другие распределения с “тонкими хвостами”, но они не позволяют учитывать так называемые “дикие случайности” (wild randomness) - события малой вероятности с непропорционально значительными последствиями, которые описываются функциями с “толстыми хвостами” согласно Б. Мандельброту (рис. 1) [3].

В ряде работ [4, 5] продемонстрировано, что нетрадиционные функции, имеющие “толстые хвосты”, больше соответствуют реальным данным о вероятностях аварийных ситуаций на производственных объектах. Однако чувствительность таких моделей ко входным параметрам всё равно не позволяет прогнозировать “дикие случайности” со сколь-нибудь значительной точностью [2, 6].

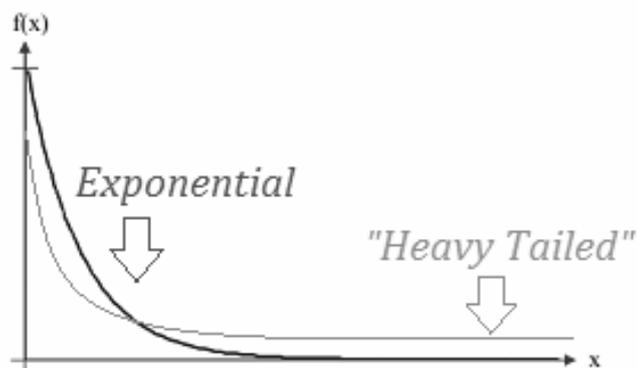


Рис. 1. “Толстохвостое” (“Heavy Tailed”) и “тонкохвостое” (в данном случае – экспоненциальное) распределения

На сегодняшний день в мире уже произошло 5 крупных аварий с повреждением активной зоны с 1970 г. (одна на Три-Майл-Айленд в 1979, одна на Чернобыльской АЭС в 1986 и три на АЭС Фукусима-1). В связи с этим в мире ожидается, в среднем, одна серьезная авария каждые 8 лет [7]. Очевидно, такая ситуация ставит под сомнение такие преимущества атомной энергетики, как энергобезопасность и экологичность, в том числе в контексте глобального потепления, и, кроме того, компрометирует атомную энергетику на рынке и в глазах общественности, ведёт к крупным финансовым потерям для компаний, работающих в данной отрасли.

Что касается причин подобных инцидентов, то согласно данным департамента энергетики США, порядка 80 % всех происшествий в промышленности, в т. ч. на ядерных объектах, вызваны человеческим фактором. Анализ, проведённый комиссариатом по атомной и альтернативным видам энергии Франции (СЕА) показал, что никакие технические инновации не могут устранить риск человеческого фактора при эксплуатации АЭС; при этом самыми серьезными аспектами были обозначены человеческие ошибки: 1) при операциях на местах (техобслуживании, испытаниях, и т. п.); 2) при малых инцидентах, каскадно приводящих к крупным происшествиям [8].

Важно отметить, что к появлению неожиданных последствий с непредсказуемым эффектом способны приводить сложность природы реальных систем и их эмерджентность (наличие в системе свойств, отсутствующих у её элементов по отдельности, но появляющихся при

их взаимодействиях). Эти системы (к которым можно отнести и АЭС со всем её персоналом, окружающей средой и т. д.) трудно смоделировать, используя уравнения, потому что их свойства эмерджентны, т. е. являются практически непредсказуемым результатом множества внутрисистемных взаимодействий. Согласно работе [9], если поведение таких систем не является очевидно простым, то в общем случае оно будет вычислительно неприводимым, т. е. узнать состояние системы в определённый момент времени можно только запустив её.

Математический анализ, выполненный ещё А. Пуанкаре в рамках теории катастроф, показал, что вблизи границ области устойчивости при малом изменении параметров системы более вероятно, что она попадет в область неустойчивости и чем ближе к этим границам, тем выше эта вероятность. С ростом числа параметров, определяющих динамику системы, появляются новые возможности утраты ею устойчивости, и вероятность этого быстро возрастает. Таким образом, чем сложнее динамическая система и чем слабее механизмы ее саморегулирования, тем более хрупким оказывается её состояние [10].

И еще одно важное следствие вытекает из теории катастроф: с приближением к границе области устойчивости даже малые изменения параметров, носящие плавный характер, могут приводить к очень быстрой потере устойчивости. Такой скачкообразный, взрывной, процесс и получил в этой теории название “катастрофы” [10].

Анализ ситуаций, в результате которых произошли все крупные аварии с тяжёлыми последствиями на АЭС показывает, что нельзя полагаться на оценку рисков на основе статистики и вероятностного подхода для принятия решений в тех случаях, когда существует возможность возникновения *труднопрогнозируемых и редких событий со значительными последствиями (“чёрных лебедей”)* [11].

Подход, который предлагается использовать в свете всего вышеизложенного, в качестве более надёжной альтернативы вероятностным и статистическим подходам, предполагает, что в таких ситуациях риск измерить нельзя, но можно измерить

хрупкость. Хрупкость, согласно Н. Н. Талебу, – это свойство системы страдать от стресса (больших нагрузок/изменчивости среды) [12]. Если система (например, мост, постройка, самолёт или АЭС) подвергается стрессу выше проектных пределов, она отказывает (выходит из строя или разрушается). Современные технические системы проектируются в той или иной степени хрупкими [12–14].

Хрупкость может в том числе заключаться в неправильном расчете риска от масштабных негативных событий (“хрупкость моделирования”). То есть системы “хрупки” к неточности оценки распределения стрессоров, а, следовательно – к ошибкам моделирования, т. к. эта неточность увеличивает вероятность выхода за пределы устойчивости, приводя к большей вероятности разрушения [12, 13].

Проиллюстрировать это можно следующим образом: если система сильнее повреждается стрессором интенсивностью $n \cdot Z$, чем стрессором интенсивностью Z , приложенным n раз – вплоть до разрушения (т. е. реакция системы на стресс нелинейна), тогда такая система особенно уязвима к экстремальным событиям и к ошибкам в их прогнозировании (рис. 2).

Иными словами, если 1 прыжок с высоты в 10 метров для вас намного опаснее 10 прыжков с высоты 1 метр – тогда в этом контексте вы хрупки (уязвимы к экстремальным событиям типа “прыжок с большой высоты” и недооценке вероятности и высоты таких прыжков).

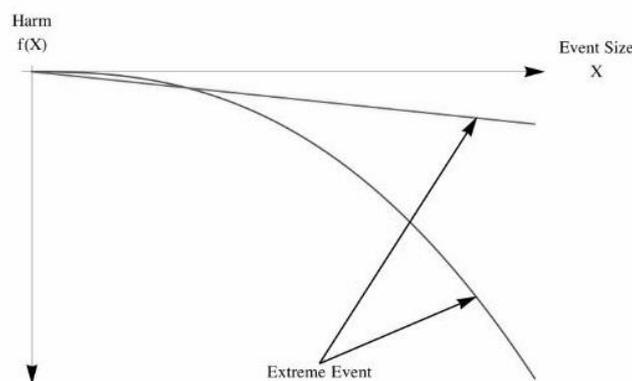


Рис. 2. Функция вреда (ущерб) в зависимости от масштаба события (Extreme Event – экстремальное событие)

Из всего вышеизложенного следует решение проблемы, которую Н. Н. Талеб назвал проблемой Черных лебедей [2]. Ее суть – в невозможности рассчитать риск последовательности редких событий и предсказать их наступление. *Чем реже событие, тем сложнее им управлять и тем меньше мы знаем о том, как часто оно случается.* Нужно принять, что хрупкость можно измерить, а риск неизмерим – в этом, на наш взгляд, и заключается основная проблема традиционных методов анализа безопасности АЭС.

Список использованных источников

1. Безопасность атомных станций: вероятностный анализ / В. А. Острейковский, Ю. В. Швыряев. М. : Физматлит, 2008. 352 с.
2. Черный лебедь. Под знаком непредсказуемости, изд. второе, доп. / Н. Н. Талеб. М. : Азбука-Аттикус, 2012. 680 с.
3. Mandelbrot, B. and Taleb, N. N. Mild vs. Wild Randomness Focusing on Those Risks That Matter / The Known, the Unknown and the Unknowable in Financial Institutions : Measurement and Theory Advancing Practice. Princeton : Princeton University Press, 2010. P. 47–58.
4. Шевченко Е. Н. Математическое моделирование распределения риска при независимых случайных величинах вероятностей исходных событий и ущерба // *Фундаментальные исследования*. 2011. № 12. С. 604–608.
5. Острейковский В. А., Саакян С. П. Модели показателей риска в теории техногенной безопасности сложных систем // *Фундаментальные исследования*. 2012. № 9. С. 162–166.
6. Silent Risk : Lectures on Fat Tails, (Anti)Fragility, and Asymmetric Exposures / N. N. Taleb // *SSRN Electronic Journal*. 2014. DOI: 10.2139/ssrn.2392310
7. François D. M. Fukushima : Consequences of Systemic Problems in Nuclear Plant Design // *Economic & Political Weekly*. 2015. № 13. P. 10–12.
8. World Nuclear Association [Электронный ресурс]. URL: <http://www.world-nuclear.org/> (дата обращения: 20.10.2018).
9. A new kind of science / S. Wolfram. Champaign, IL : Wolfram Media, 2002. 1197 p.
10. Теория катастроф, изд. третье, доп. / В. И. Арнольд. М. : Наука, 1990. 128 с.
11. Taleb, N. N. Errors, robustness and the fourth quadrant // *International Journal of Forecasting*. 2009. № 4. P. 744–750.
12. Антихрупкость. Как извлечь выгоду из хаоса / Н. Н. Талеб. М. : Азбука-Аттикус, 2014. 770 с.
13. Taleb N. N., Douady R. Mathematical Definition, Mapping, and Detection of (Anti) Fragility / *Quantitative Finance*. 2013. Vol. 13, № 11. P. 1677–1689.
14. Kennie H. Jones. Engineering Antifragile Systems: A Change In Design Philosophy // *Procedia Computer Science*. 2014. № 32. P. 870–875.