

# ВЕРОЯТНОСТНИЯТ АНАЛИЗ НА БЕЗОПАСНОСТТА (БАБ): ЕДНА РАЗЛИЧНА ГЛЕДНА ТОЧКА В АНАЛИЗИТЕ НА БЕЗОПАСНОСТТА

Емил Кичев

## PROBABILISTIC SAFETY/RISK ANALYSIS (PSA/PRA): ONE DEFERENT POIT OF VIEW IN THE SAFETY ANALYSES

Emil Kichev

*The purpose of this paper is to present some observations of the author in the field of Probability Safety/Risk Analysis theory (PSA/PRA) and their use to ensure the safety of the Nuclear Power Plants (NPPs). Some important features are presented in the analysis and assessment of hazards and risk and risk management and safety management of NPP, the training of PSA/PRA and their relationship with other disciplines. Some important issues to think about are: Lost in translation; The graphical representation of the risk – visualization of the mathematics; The relationship between safety analyses, deterministic and probability analyses; The importance of the PSA/PRA training and its relationship with other disciplines in the field of nuclear energy, safety and risk management.*

### Въведение

Развитието на технологиите е насочено към удовлетворяване на определени потребности на хората. Същевременно нарастването на производствената дейност и нейната енергоемкост все повече влияе върху живата и нежива природа. Днес това влияние има глобален характер и последиците му могат да бъдат катастрофални от здравето на човека и екологията. Такива примери са аварията в Севезо (Италия, 10 юли 1976), Три Майл Айлънд (Пенсилвания, САЩ, 28 март 1979 г.), пожарът в тунела под Монт Блан (Швейцария, 24 май 1999 г.), Бопал (Индия, 3 декември 1984 г.), Чернобил (Украйна, 26 април 1986 г.), взривяването на космическата совалка Чалънджър (САЩ, 28 януари 1986 г.) и кулите близнаци в Ню Йорк Сити (САЩ, 11 септември 2001 г.), ЯЦ Фукушима (Япония, 11 март 2011 г.), зачестилите наводнения, суши, пожари през последните години. Ежедневието на хората и дейността на компаниите протича в границите между пълната невъзможност и сигурността, т.е. в условията на постоянна неопределеност и риск. На това се дължи нарастващите усилия на обществото за анализ на различните природни и техногенни рискове, задължително

отчитайки ползите, които дадената дейност носи. Управлението на риска има за цел да улесни процеса на избор на стратегии и методи за осигуряване на максимална защита на здравето на хората, околната среда и конкурентността на фирмите в условията на динамичния свободен пазар.

## Какво е риск?

Темата за риска е много популярна, особено в последните години. Тя се обсъжда на всякакви нива и във всякакви области - в промишлеността, в политиката, в ежедневието. Огромен е броят на документите по темата. Терминът "риск" се използва в много и различни значения. Обсъждат се много и различни видове риск: икономически; инвестиционен, военен, политически, бизнес, социален, екологичен, на безопасността.

В анализите на риска, на безопасността, във ВАБ най-често използваните термини са:

- Опасност, безопасност, риск;
- Честота, вероятност;
- Защита в дълбочина; Физически бариери; Защитни Функции (ЗФ);

Нива на защита;

- Системи за безопасност (СБ) (защитни, локализиращи, осигуряващи, управляващи);

- Оборудване - Конструкции, Системи и Компоненти (КСК), важни за безопасността

- Предела за безопасност; Проектни основи; Проектни предела; Предела и условия за експлоатация; Категории на състоянията;

- Проектни, извънпроектни, тежки аварии;

- Разширени проектни условия;

- Техническа Обосновка на Безопасността (ТОБ / FSAR);

- Анализи на безопасността, Оценки на безопасността;

- Детерминистични анализи на безопасността; Вероятностни анализи на безопасността (ВАБ, PSA / PRA).

Темата за риска и вземане на информирано решение не е от вчера. Като пример, който датира от 431/430 г. преди Христос, може да се посочи написаното от древногръцкият историк и военачалник Тукидид (на гръцки: Θουκυδίδης; на латински: Thucydides). В своите 8 книги за „История на Пелопонеската война“, той е записал надгробна реч на Перикъл в чест на падналите в Пелопонезката война. В нея се казва: *“... Ние атиняните, сами вземаме решенията в политиката или ги подлагаме на открити дискусии: защото не мислим, че има несъвместимост между думи и дела; най-лошото е да се прибърза, преди последствията да са били*

*подробно обсъдени. И това е още една особеност, в която се различаваме от другите хора. Ние сме способни едновременно да поемаме рискове и да ги преценяваме предварително. Другите са смели от невежеството; и когато спрат да мислят, те започват да се страхуват. Но човекът, който може да бъде считан за смел е този, който най-добре знае значението на това, което е сладко в живота и на това, което е ужасно, и след това непреклонен да посрещне това, което ще се случи. ...”*

Таблица 1. Резултати от търсенето в Google на термини, свързани с риска

Ключова дума (търсене в Google)	Показан резултат брой
Опасност	8,140,000
Hazards	363,000,000
Безопасност	11,200,000
Safety	3,390,000,000
Риск	65,800, 000
Risk	1,510,000,000
Честота	2,340,000
Frequency	2,220,000,000
Вероятност	2,720,000
Probability	248,000,000
Анализ	160,000,000
Analysis	2,420,000,000
Оценка	219,000,000
Assessment	1,520,000,000
Управление на риска	57,800,000
Risk management	1,310,000,000

### Загубени в превода: Опасност и риск (hazard and risk)

Колко често употребяваме думата “риск” в ежедневието ни? А замисляли ли сме се върху нейния смисъл? И как този смисъл и употреба влияе върху реалната оценка на нашата ежедневна дейност, където доброволно или не поемаме някакъв риск?

Понятието риск се използва във всички видове човешка дейност с цел да се оцени опасността или вредата от тази дейност за отделния човек и за обществото. Много често понятията “опасност” (hazard, danger), “вреда, щета” (damage), “риск” (risk) се използват като синоними, но това е неточно. “Опасност” е насочено понятие, означава нежелано и неблагоприятно действие на даден фактор или действие. То обаче е неподходящо, когато са необходими количествени оценки за това, колко е опасен този фактор. “Вреда/щета” носи смисъла на вече реализирана опасност, като вече проявило се неблагоприятно действие.

Най-общо рискът се определя като възможността (likelihood) да се случи нещо неблагоприятно, като възможна опасност (hazard). Да се рискува означава съзнателно да се приеме тази възможност. По-точно това означава “вероятността определено нежелано събитие да се случи в течение на даден период от време или да възникне в резултат на определена ситуация”. [10,11] Анализът на риска включва точното дефиниране на събитието, намиране на начин за количествена оценка на възможността за появата на това събитие при определени обстоятелства и последствията от тази поява.

Общоприетото значение за риска:

- Възниква от “опасност, беда, заплаха” (“hazard, danger, threat).
- Има три аспекта. Единият е възможността (likelihood) (пресметната чрез вероятността/честотата) да се случи дадено събитие, вторият - тежестта (severity), величината (magnitude) на последствията от него и третият – неопределеността (uncertainties) на възможността и на тежестта (на първите два). В разговорната реч много често използваме думата “риск”, имайки предвид повече последствията, отколкото вероятността/честотата за поява на даденото нежелано събитие;
- Риск е честотата/вероятността, с която дадена последователност се случва;
- Честота или степен/вероятност са брой на появата/случките за дадено събитие за определен интервал от време;
- Рискът се представя чрез единична цифрова стойност от скала (скаларно количество);
- Общият риск се представя чрез точкова / единична оценка;
- Всеки сценарий на авария се представя чрез точка от скала (големината на рискът на най-значимия сценарий за дадена аварията е най-голямата стойност на произведението от честотата и последствията).

Понятието за риск прави две разграничения: [49]

- Разграничава понятията “неопределеност” (uncertainty) и “риск” (risk);
- Разграничава понятията “опасност” (hazard) и “риск” (risk);
- Включва както несигурност/неопределеност (uncertainty), така и ня-

какъв вид загуба / вреда (damage, hurt, harm, impair, injury), която може да се получи.

Символично представяне:

- Риск = несигурност + щета / загуба / вреда
- Risk = uncertainty + damage

Опасност (hazard) - в речниците се дефинира като “източник на опасност”, т.е. може да приемем, че опасността съществува само като източник.

Риск (risk) – дефинира се като „възможността за загуба или нараняване“ и „степената на вероятност за такава загуба“. И ако опасността съществува само като източник, то:

- Рискът включва вероятността/честотата от превръщането на този източник в действителен причинител на щета, нараняване или някаква форма на загуба;

- Рискът е количествена мярка за опасността.

Пример за разликата между опасност и риск е показан на Фигура 1 – когато риболовецът-рибар е на брега на езерото, за него има опасност, а когато той е в езерото, за него съществува риск.



Фигура 1 Разлика между опасност и риск

### **Загубени в превода: ~Честота и вероятност (frequency and probability)**

Има ли разлика в термините “Честота” и “вероятност” (frequency and probability). Категоричният отговор е да. Той е даден още през 1981 г. от Kaplan S., J. Garrick, с тяхната статия “On the Quantitative Definition of Risk”.

Специалистите спорят за смисъла на вероятностите от поне 200 години, от времето на Лаплас (Laplace) и Бейс (Bayes). Два са основните метода:

- “Обективистичен” или “честотен” метод, при който вероятността се разглежда като нещо външно, резултат от повтарящи се експерименти, и
- “Субективистичен” метод, при които вероятността се разглежда като израз на вътрешно състояние – състояние на знания или състояние на доверие

Stanley Kaplan & John Garrick предлагат (1981): [49]

- “Честотата” да я отнасяме до резултата от експерименти от някакъв

вид, включващ повтарящи се опити. Така честотата е „твърдо“ измеримо количество. Това е така, дори ако експериментът е само мисловен или експериментът трябва да се направи в бъдещето. В тази концепцията, честотата е ясно определено, относително обективно, измеримо като количество.

- “Вероятността” да я използваме за числова мярка за състояние на познание, степен на вяра, състояние на доверие, мяра за вяра.

## Графично представяне на риска: още за математиката

По отношение на техническо значение на риска, когато анализираме даден риск, ние се опитваме да си представим какво ще стане в бъдещето, ако извършим определени действия (или не ги извършим), т.е същността на анализа на риска се състои в отговор на следните въпроси:

- Какво може да се случи (или какво може да се обърка? (сценарий -  $S_i$ );
- Колко очаквано/вероятно е това да се случи? (възможност/вероятност/честота -  $P_i$ );
- Какви са последствията, ако това се случи? (последствия -  $C_i$ );
- Колко уверени сме в нашите отговори на първите три въпроса? (отчита значението на неопределеностите);
- Къде да се насочат (най-ефективно) наличните ресурси за намаляване на общия риск?

Набора от тези въпроси може да се представи по следния начин:

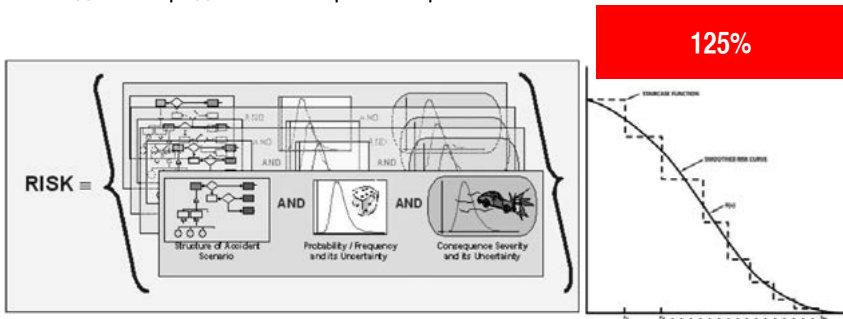
$$\text{RISK} = R = \{(S_i, P_i, C_i)\}, i=1,2, \dots, n$$

За да се отговори на тези въпроси, може да се изготви списък с резултатите или т.н. „сценарий“ (Таблица 2)

Таблица 2. Списък с резултатите (списък на сценариите)

Сценарий	Възможност очакване	Последствие	Сумарна вероятност
$S_1$	$P_1$	$C_1$	$P_1 = P_2 + P_1$
$S_2$	$P_2$	$C_2$	$P_2 = P_3 + P_2$
....	....	....	....
$S_i$	$P_i$	$C_i$	$P_i = P_{i+1} + P_i$
....	....	....	....
$S_{N-1}$	$P_{N-1}$	$C_{N-1}$	$P_{N-1} = P_N + P_{N-1}$
$S_N$	$P_N$	$C_N$	$P_N = P_N$

Ако де нанесат точките от таблицата в графика, ще се получи стъпаловидна функция, показана като пунктирна линия на Фигура 2. Ако се представи стъпаловидната крива с гладка крива  $R(x)$ , може да се разглежда тази гладка крива като представляваща действителния риск и може да се определи като „крива на риска“.



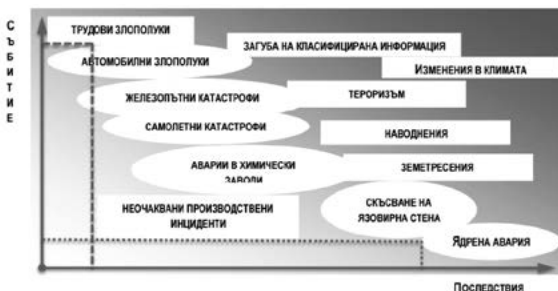
Фигура 2. Крива на риска / Risk Curve [49]

Най-известните примери за такива криви са публикувани в изследването за първия пълен ВАБ на ядрените реактори, *Reactor Safety Study*, WASH 1400 [48].

Математически рискът се пресмята като произведение от вероятността/честотата за поява на дадено събитие и размера на последиците от него. Отчитайки трите аспекта на риска, математически рискът се пресмята като произведение от вероятността/честотата за поява на дадено събитие и размера на последиците от него. Той може да се представи по следния начин, отчитайки размерностите:

$$\text{РИСК} \left[ \frac{\text{Щета}}{\text{Време}} \right] = \text{ЧЕСТОТА} \left[ \frac{\text{Събитие}}{\text{Време}} \right] \times \text{РАЗМЕР НА ПОСЛЕДСТВИЕТО} \left[ \frac{\text{Щета}}{\text{Събитие}} \right]$$

Графичното представяне на риска (Фигура 3) дава възможност да се визуализира сравнението на риска за различни видове дейности/промишлености. Две са основните направления за размисъл и действия: Съизмеримостта на рисковете (например рискът от трудови злополуки или автомобилни катастрофи е съизмерим и дори по-голям от този от аварията в ЯЦ, но те се различават принципно, като единият риск има голяма честота на поява на събитията с малък размер на последиците, докато другият има малка честота на поява на събитията с голям размер на последиците) и Възможност за избор при управлението на даден риск, като мерките могат да бъдат превантивни или намаляващи/ограничаващи последиците.



Фигура 5. Графично представяне на различни видове риск ( [събитие x последиствия] )

Много практично е представянето на риска като отношение на източника на реалната опасност и взетите по отношение на нея мерки за безопасност. [49]

$$\text{РИСК} = \frac{\text{Опасност}}{\text{Мерки за безопасност}}$$

Търсенето на отговори на такива въпроси като “Кой е източникът на опасност?”, “Какви мерки за безопасност могат да се предприемат?”, “Кои от мерките осигуряват най-голяма защита?”, “С колко ще се измени риска при реализирането на дадена мярка за безопасност?”, “Колко струва реализирането на дадена мярка за безопасност?”, или “Колко струва намаляването на риска до зададена стойност?” е основна част при управлението на риска.

### Загубени в превода: Анализ и оценка (analysis, estimation, evaluation, assessment)

В английския терминология се използват понятията:

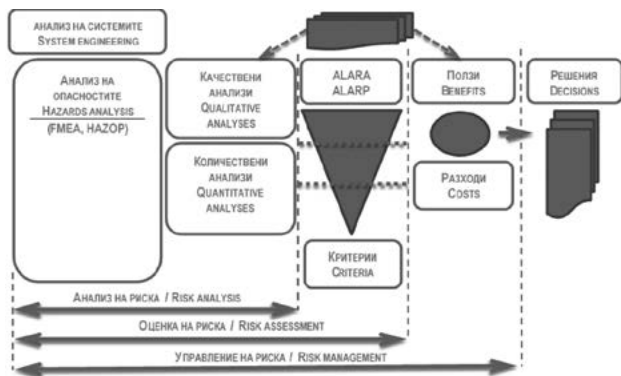
- Risk analysis Risk estimation Risk evaluation Risk assessment

Има ли разлика между тях? Как са преведени на български? Отговор на тези въпроси може да се получи с помощта на фигура Фигура 6. [21]

Най-напред трябва да се направи анализ на опасностите (hazards analysis). Използват се различни методи, например FMEA, HAZOP.



Анализ на риска се прави, когато анализът на опасностите се допълнят с качествени или количествени анализи на опасността. Оценка (assessment) на риска се прави, когато анализът на риска се допълни с разработването на критерии за риска и се направи сравнение по метода/принципа ALARA – As Low as Reasonably Achievable – толкова ниско, колкото е разумно постижимо). Управлението на риска (risk management) се постига, когато оценката на риска се допълни с анализ на ползите (benefits) и разходите (costs). Ако тези резултати се отчетат по някакъв начин при вземането на решения, такива решения могат да се определят като обосновани/информирани за риска при планирането на мерки за намаляване на риска / повишаване на безопасността (за предотвратяване на поява на дадени събития и/или намаляване на последствията от тях).



Фигура 6. Разлика между термините Risk analysis Risk estimation Risk evaluation Risk assessment  
(Източник: IAEA, Safety Glossary, 2018 Edition)

## Толерантност към риска (Tolerability of risk)

Толерантността към риска не е приемливост. Това означава “готовността на човек да живее с даден риск с цел да си осигури определени удобства и да бъде уверен, че поетият риск се контролира правилно. [10,11] Да се толерира даден риск не означава, че го разглеждаме като незначителен, а че трябва постоянно да го наблюдаваме и да го намаляваме, ако или както можем. От друга страна даден риск е “приемлив” то-

гава, когато ние сме готови да го приемем такъв, какъвто е - за удобство на живота или работата ни.

Обществото прави избора дали да контролира “доброволно поетия” или “природния” риск, ако той засяга достатъчно голям брой хора. В случая, тъй като отделния индивид не поема тези рискове по собствена воля, то тогава е важно всички ние да бъдем убедени, че рисковете се контролират правилно.

При контролиране на риска от обществото, съответните оценки не зависят от отделния индивид, които понесат риска. Също така рискът се разпределя неравномерно. Някои хора поемат по-голяма, други - по-малка част от него. Ползите от риска също могат да се разпределят неравномерно.

Факт е, че всички ние сме предпазливи в отношението си към дейности, които прибавят допълнително рискове към тези, които поемаме лично. От една страна хората искат тези допълнителни рискове да бъдат сведени до ниво, много по-ниско в сравнение с риска, който те лично са приели. От друга страна - ако нивото се приеме за допустимо, то хората искат да знаят как се осъществява контролът над опасностите и какво правят ръководствата на т.н. потенциално опасни предприятия за намаляване на риска.

### **Загубени в превода: анализ на безопасността, детерминистични и вероятностни методи (safety analyses, deterministic and probabilistic safety analyses)**

Каква е разликата между анализите на безопасност, детерминистичните и вероятностните анализи на безопасност? Отговор на този въпрос е представен схематично на Фигура 7, следвайки дефинициите, дадени в документа Safety Glossary, 2018 Edition, на IAEA и на изискванията на НОБЯЦ на АЯР. [1,21] Чл. 59. ... (2) Анализът на безопасността се извършва с използване на детерминистични и вероятностни методи, като нивото на безопасност, постигнато с проекта, се обосновава с детерминистичен анализ на безопасността. Вероятностният анализ се използва при избора и категоризацията на изходните събития и аварийните последователности за допълване на информацията за процесите и поведението на ЯЦ и за оценка на приноса на различните аспекти на безопасността в общото ниво на безопасност. (3) Резултатите от проведения анализ на безопасността се използват в подкрепа на процеса на вземане на интегрирани решения за управление на безопасността на ЯЦ.”



Фигура 7. Връзка между термините  
 Анализ на безопасността, детерминистични и вероятностни анализ  
 (Източник: IAEA, Safety Glossary, 2018 Edition)

Оценката на безопасността включва два основни елемента:

- Анализи на безопасността (safety analyses);
- Определяне и оценка на инженерните фактори, важни за безопасността.

Анализите на безопасност (safety analyses) се извършват чрез два допълващи се метода;

- Детерминистични анализи (deterministic analyses). Те са основни;
- Вероятностни анализи (probabilistic analyses). (допълват детерминистичните).

Детерминистичните анализи (deterministic analyses) използват предварително разработени ръководства и правила за:

- Определяне и категоризация на събитията, които трябва да бъдат отчетени в проектните основи;
- Анализ на граничните сценарии като резултат от определените събития;
- Анализ на последствията и верификация, че са изпълнени критериите за приемливост;
- Анализ на съответствието на експлоатационните граници/лимита с направените допускания;
- Оценка на степента на консерватизъм.

В ядрената енергетика се използват такива детерминистични методи, като:

- Максимална Хипотетична/Възможна Авария (МХА) (Maximum Credible Accident - MCA). Този метод търси отговор на въпроса – кой е най-тежкото, което може да се случи? Ако последствията от това събитие са допустими, приема се, че безопасността е осигурена и не се търсят други мерки);

- Избира се възможно най-тежката авария/събитие, задава се предварително. Ограничения: Как да се определи? Субективност. Много голям консерватизъм. Оценяват се последствията от събитието/аварията;
- Пример: WASH-740, Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large NPPs: A Study of Possible Consequences if Certain Assumed Accidents, Theoretically Possible but Highly Improbable, Were to Occur in Large NPPs, WASH-740, U.S. Atomic Energy Commission, Washington D.C., March 1957, The Brookhaven Report;
- Оценява максимално възможните щети при стопяването на а.з. на голям ЯР без ХК;
- Предлага концепцията за използване на херметична конструкция (ХК-containment).

- Максимална Проектна Авария (МПА) (Design Basis Accident – DBA). Този метод използва комбинацията от анализите на: (1) Сценарий на аварии с ниска честота и (2) Сценарии на Очаквани Експлоатационни Събития (ОЕС) с висока честота, за който ЯЕЦ трябва да бъде така проектирана, че последствията да са без човешки жертви и без радиоактивни изхвърляния в околната среда.

- Определение (US-NRC) - Предварително зададена авария/събитие, за което ядрения блок трябва да бъде проектиран и изграден, така, че да устои без да откаже на оборудване (КСК) , необходимо за осигуряване на безопасността, здравето на персонала, населението и околната среда;
  - Традиционен, общоприет е детерминистичния подход (ДА) за осигуряване на ядрената безопасност;
  - ЯЦ е проектирана и изградена да устои на определен набор от аварии/събития;
  - Разглежда се само единичен отказ на активно оборудване;
  - Операторските действия са отчетени в ограничен обем;
  - Анализите на аварията в ядрените централи ТМ1-2 (1979) и Fukushima Dai-ichi (2011) показват най-съществените проблеми на този подход.
- Критерий за Единичния Отказ (Single Failure Criteria). Този метод

се прилага за анализ на надеждността на Системите, Важни за Безопасността (СВБ). Изискванията към този метод са описани през 1971 г. във Code of Federal Regulation 10 CFR 50, Appendix A. Терминът “единичен отказ” означава събитие, при което даден елемент губи способността си да изпълни проектите си функции. За единичен отказ се приема и група (множество) от откази, които са причинени от появата на дадено събитие. Прилагането на метода за единичен отказ при проектирането на ЯЕЦ определя структурна и функционалната резервираност на критичните елементи или канали на СБ и СВБ.

- **Защита в Дълбочина (Defence in Depth).** Това е основната стратегия за осигуряване на безопасността на ЯЕЦ. Състои се от две части. С От първостепенно значение е първата - да се предотвратяват аварии, а втората е че, ако това се случи, да се ограничат последствията и да се предотвратява тяхното по-нататъшно задълбочаване. Предотвратяването има първостепенно значение, защото се основава на разбирането, че е по-ефективно да се осигурят средства за предотвратяване на отклонения от нормалните състояния на ЯЕЦ в сравнение с осигуряване на средства за ограничаване на последствията. Защитата в дълбочина има четири физически бариери и пет независими йерархични нива. Те се структурирани така, че отказа на едно или няколко нива (респективно бариери) да не води до отказ на следващото ниво или бариера.

Използването на детерминистичните методи изисква повече средства за осигуряване на безопасността и независимост на средствата за различните нива.

Потенциални слаби места на “детерминистичната” защита в дълбочина са:

- Прекалено големият брой на средствата за защита може дори да увеличи риска заради голямата сложност;
- Средствата за защита могат да се застъпват като функционалност и ефекти;
- Анализът на събитията с изключително малка честота (т.н. редки събития);
- Класификацията по важност на средствата за защита;
- Липсата на количествена оценка на пределите на безопасност, механизмите на деградация на физическите бариери и на риска.

## **Вероятностен анализ на безопасността (ВАБ) (Probabilistic Safety / Risk Analysis – PSA/PRA)**

Вероятностният анализ на безопасността (ВАБ) е аналитичен инстру-

мент за Определяне на аварийните сценарии, оценка на вероятността на всеки сценарий и оценка на последствията за всеки сценарий. ВАБ е техника за анализ на риска, като се опитваме да си представим какво ще стане в бъдещето, ако извършим определени действия (или не ги извършим / бездействие), т.е същността на анализа на риска се състои в отговор на следните въпроси:

- Какво може да се случи (или какво може да се обърка? (сценарий -  $S_i$ )
- Колко очаквано/възможно/вероятно е това да се случи? (възможност/честота/вероятност -  $P_i$ )
- Какви са последствията, ако това се случи? (последствия -  $C_i$ )
- Колко уверени сме в нашите отговори на първите три въпроса? (отчита значението на неопределеностите)

Вероятностните методи допълват детерминистичните по отношение на т. нар. "остатъчен риск" (риск, който продължава да съществува, независимо че са предприети всички технически и организационни мерки). Вероятностният подход дава възможност по-добре да се оценят основните фактори, които допринасят за този риск.

Вероятностният анализ на безопасността трябва да: [1,7,19,20]

- Анализира систематично съответствието на общата безопасност на ядрения блок с основните критерии за безопасност;
- Демонстрира балансираността на проекта, при който всяко зададено изходно събитие има пропорционално влияние върху общия риск от ядрената централа и безопасността се осигурява основно с първите две нива на защитата в дълбочина;
- Докаже, че са предотвратени малки отклонения на експлоатационните параметри, които могат да доведат до негативни изменения в енергийния блок;
- Оцени честотата за повреда на активната зона и за големи радиоактивни изхвърляния в околната среда;
- Оцени честотата и последствията от характерните за площадката външни събития;
- Класифицира конструкции и оборудване, за които са необходими проектни подобрения или изменение на експлоатационните инструкции, водещи до намаляване на честотата на тежките аварии или до ограничаване на последствията от тях;
- Оцени аварийните инструкции.

За целта ВАБ трябва да съдържа: [1,7,19,20]

- Всички експлоатационни състояния на енергийния блок и всички зададени изходни събития и опасности (вкл. вътрешни пожари и наводнения, извънредни климатични условия и сеизмични въздействия);

- Всички възможни значими зависимости, водещи до откази по обща причина;
- Анализи на неопределеността и на чувствителността на резултатите;
- Реалистично моделиране на поведението на енергийния блок с отчитане на действията на оперативния персонал съгласно експлоатационните и аварийните инструкции;
- Анализ на човешките грешки с отчитане на факторите, които могат да влияят върху поведението на оперативния персонал във всички експлоатационни състояния и аварийни условия.

Предимствата на ВАБ като метод за анализ на риска от ЯЦ се състоят в:

- Систематичност на подхода и възможност за отчитане на различно ниво на детайлизация;
- Интеграция на разнообразна информация;
- Възможност за отчитане на различни и многобройни взаимодействия;
- Количествена оценка на състоянието на детайли от проекта на оборудването;
- Количествена оценка като аргументи в процеса на избор на решения;
- Възможност за анализ на чувствителността на резултатите;
- Възможности за комплексност и принципност при оценката на източниците на неопределеност.

## **Хронология в развитието на ВАБ**

Първият ВАБ (известен като документ WASH-1400) е публикуван през 1975 г. от Регулаторната комисия на САЩ (US NRC). Това е пълен анализ на риска за две ядрени централи в САЩ. Част от основните тези в анализа, неоткрити дотогава чрез детерминистичните методи, впоследствие са потвърдени в практиката. Този факт доказва необходимостта от провеждане на вероятностен анализ на безопасността. Постепенно регулаторните органи на различни страни въвеждат задължително изискване за използването на вероятностния анализ като допълнение към детерминистичния за обосноваване на безопасността на ядрените централи. До края на XX век е натрупан значителен опит в областта на вероятностния анализ, издадени са редица теоретични разработки и ръководства. Вниманието се насочва към поддържане на съответствието на ВАБ с реалната конфигурация на ядрения блок, за който е извършен.

В началото на XXI век значително е разширено използването на ВАБ като информираща за риска и използваща количествени показатели основа, на която се базира процесът на вземане на решения. На преден план излиза въпросът за качеството на ВАБ. През 2002 г., след петгодишна съвместна работа на екипи от няколко специализирани институции, в САЩ е публикуван стандартът за оценка на качеството на ВАБ в съответствие с нуждата от неговото приложение в ядрените централи. През 2006 г. Международната агенция за атомна енергия (МААЕ) публикува подобен документ - TECDOC-1511. В документа са систематизирани областите на приложение на ВАБ:

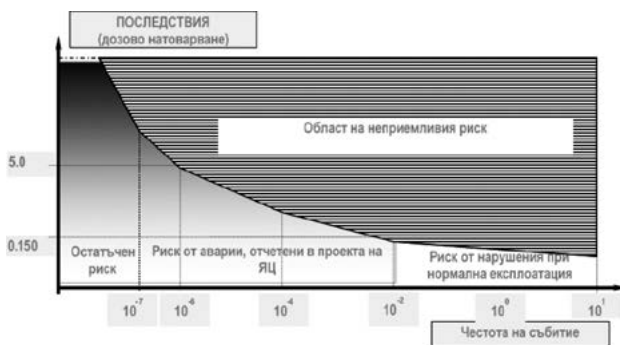
- Оценка на безопасността (обща безопасност на ядрените централи; периодични прегледи на безопасността; анализ на физическата защита);
- Оценка на проекта;
- Експлоатация на ядрени централи (намаляваща риска оптимизация на техническата поддръжка; управление на ресурса на оборудването; разработване на аварийни процедури; управление на аварии; аварийно планиране; програми за обучение; управление на конфигурацията, мониторинг на риска);
- Постоянни изменения в работеща централа (оптимизация на технологичния регламент; оптимизация на разрешените времена на престой и интервали между изпитанията; информиращ за риска безразрушителен контрол; класификация на оборудването по отношение на риска);
- Надзорни дейности (класификация, планиране);
- Оценка на проблеми, отнасящи се до безопасността (оценка и класификация на коригиращи и превантивни дейности по отношение на риска).

С публикуването на Наредбата за осигуряване на безопасността на ядрените централи (НОБЯЦ) от 30.07.2004 г., Агенцията за ядрено регулиране (АЯР) постави на най-съвременно ниво основните правила и критерии за ядрена безопасност и радиационна защита, както и организационните мерки и техническите изисквания за осигуряване на безопасността при избор на площадка, проектиране, строителство, въвеждане в експлоатация и експлоатация на ядрените централи. НОБЯЦ е актуализирана през 2016 г., въз основа на опита след аварията в ЯЦ Фукушима (март 2011 г.)

Конкретно, по отношение на риска от експлоатацията на ЯЦ, където обикновено последствията се приемат като резултат от облъчване (например получена средно-годишна индивидуална ефективна доза), рискът е визуализиран на Фигура 6. По абцисата са представени категориите постулирани (предварително зададени и отчетени в проекта на ЯЦ) събития в зависимост от тяхната честота на поява.



- Категория 1. Стационарни състояния и преходни процеси при нормална експлоатация;
- Категория 2. Очаквани експлоатационни събития с честота на поява по-голяма от  $10^{-2}$  за година;
- Категория 3. Аварийни състояния с ниска честота на поява в диапазона между  $10^{-2}$  и  $10^{-4}$  за година;
- Категория 4. Проектни аварии с много ниска честота на поява в диапазона между  $10^{-4}$  и  $10^{-6}$  за година.



Фигура 6. Области на риска в зависимост от честотата на събитията в ЯЦ и техните последствия

- Остатъчен риск** - риск, който продължава да съществува, независимо че са предприети всички технически и организационни мерки
- Неприемлив риск** - риск, който не може да бъде оправдан дори и при изключителни обстоятелства
- Честота  $10^{-7}$**  - означава, че събитието може да се появи веднъж на 10,000,000 години

Ефективна доза – според българското национално законодателство за максимално ограничаване на вредното въздействие на облъчването върху здравето на хората, е приета допустимата годишната индивидуална ефективна доза да не е по-голяма от 0,150 милиСиверта за всички експлоатационни състояния на ЯЦ, а годишната индивидуална ефективна доза не трябва да бъде по-голяма от 5 милиСиверта за първата година след проектна авария (за сравнение - усреднената годишна ефективна доза от всички рискове от естествена радиация - от земната радиоак-

тивност, от радиоактивността в човешкия организъм, от космическите лъчения и от радона, е около 2.3 милиСиверта).

## **Нива на ВАБ и тяхната връзка с физическите бариери за осигуряване на безопасността на ЯЦ**

ВАБ има три нива на анализ: [1,7,19,20,21], като резултатите от всяко ниво осигуряват входящи данни за следващото. Тъй като изискванията са анализите да обхващат всички възможни състояния на ЯЦ, всяко ниво на ВАБ се извършва както при работа на пълна мощност, така и при работа на ниска мощност и при спрян реактор.

- **Ниво 1** – анализ на сценариите, които биха могли да доведат до повреда на анализ на сценариите, които биха могли да доведат до повреда на ядреното гориво (ЯГ), както в така и извън активната зона на реактора и оценка на тяхната честота; ВАБ ниво 1 анализира начините/сценариите за нарушаване на целостта на обвивката на ТОЕ и на първи контур (за PWR);

- **Ниво 2** – анализ на сценариите, които влияят върху целостта на херметичната конструкция (ХК) (containment) на ядрения блок; на нейното поведение при различни сценарии; на големината на радиоактивния източник. Резултатът е оценка на честотата за повреда на НК и на големи радиоактивни изхвърляния (LRF);

- **Ниво 3** – анализ на радиоактивните последствия (оценка на пътищата за разпространение на радиоактивния източник в околната среда, големината на замърсяването и радиологичните ефекти.) Резултатът е оценка на късните ефекти върху здравето на хората и на големината на замърсените площи. ВАБ ниво 3 анализира ефективността на аварийното планиране.

## **Общоприети критерии за риска от ЯЦ**

USNRC общи цели на безопасността (Policy Statement, 8/21/86, 51 FR 30028)

Качествени критерии:

- Да няма значителен допълнителен риск, причинен от ядрена енергия за живота и здравето на всеки човек в обществото
- Сравним или по-малък риск за обществото в сравнение с риска, причинен от други технологии за производство на енергия
- От общите (дългосрочни) цели, USNRC определи специфичните (краткосрочни) цели (жалони в пясъка “lines in the sand”)

- Количествените специфични цели по отношение на здравето (първоначално известни като вероятностни цели на безопасността - Probabilistic Safety Goals)

Пример за групиране на оборудване (КСК) по детерминистични критерии, съгласно изискванията на МААЕ [21]

## Предизвикателства пред ВАБ за ЯЦ

Важни въпроси при моделирането във ВАБ ниво 1, появили се след аварията с ЯЦ Фукушима:

- Моделиране на компютъризирани системи;;
- Моделиране на пасивно оборудване;
- Площадка с няколко блока/съоръжения (Multi unit PSA and risk aggregation) (Показатели на риска (risk metrics): определяне на CDF/FDF и LER/LR при отчитане на всички блокове и съоръжения на една площадка: в процес на разработване са и постигане на консенсус по тях);
  - Взаимозависимости между екипите на двата блока (MUPSA project);
  - Природни опасности Моделиране на взаимосвързани външни и вътрешни природни опасности (без сеизмични въздействия) (correlated hazards);
  - Увеличено време за изпълнение на функциите (mission time) (зависимост от (1) мощността на реактора; (2) Крайните състояния (PDS-CD);
  - Отказ по обща причина (CCF) заради компютърни програми;
  - Моделиране влиянието между блоковете, разположени на една площадка (multi-unit effects).

## Заклучение

*В доклада са представени някои важни разлики между термините опасност и риск, честота и вероятност, анализ и оценка. Общоприетата формула за риска е визуализирана чрез графично представяне, което улеснява възприемането и разбирането за риска и неговия анализ. Представянето на риска като отношение на източник на опасност и мерки за безопасност показва директната зависимост между вложените средства за мерките за безопасност и намаляването на риска. Чрез принципни схеми са визуализирани взаимовръзките между анализите на безопасност, детерминистичните и вероятностните анализи. Представен е пример за значението на обучението по ВАБ и връзката му с останалите дисциплини в областта на ядрената енергетика, безопасността и управлението на риска.*

## Използвана литература:

- [1] Наредба за “Осигуряване безопасността на ядрени централи”, АЯР, (2016, изм. ДВ бр.37 от 04 май 2018 г.)
- [2] Наредба за осигуряване на безопасността при управление на отработено ядрено гориво, АЯР, (2004, изм. и доп. ДВ. бр.37 от 04 май 2018 г.)
- [3] Наредба за аварийно планиране и аварийна готовност при ядрена и радиационна авария, АЯР, (2011, изм. и доп. ДВ, бр. 55 от 07.07.2017 г.)
- [4] Наредба за радиационна защита, АЯР, (2018, Обн., ДВ, бр.16, 20 февруари 2018 г.)
- [5] Наредба за безопасност при управление на радиоактивните отпадъци, АЯР, (2013, Обн., ДВ, бр.37, 04 май 2018 г.)
- [6] Ръководство РР-5 за провеждане на детерминистични оценки за ЯЦ, АЯР, (2010)
- [7] Ръководство РР-7 за провеждане на ВАБ за ЯЦ, АЯР, (2010)
- [8] Ръководство РР-6 за използване на ВАБ в помощ на управлението на безопасността на ЯЦ, АЯР, (2010)
- [9] Радиационният хормезис при човека. Позитивното действие на облъчването с малки дози, Георги Василев, 2012
- [10] Толерантност към риска от АЕЦ, (1994), Издателска къща “Литавра”
- [11] *The tolerability of risk from Nuclear Power Stations, UK-HSE, 1992*
- [12] *IAEA, Safety Fundamental Principles, Safety Fundamentals SF-1, (2006)*
- [13] *IAEA, Safety Assessment for Facilities and Activities, General Safety Requirements, Part 4, GSR Part 4, rev 01, IAEA, Vienna (2016)*
- [14] *IAEA, Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, GSR Part 7, (2015)*
- [15] *IAEA, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, GSR Part 3, (2014)*
- [16] *IAEA, Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety Requirements SSR-2/1, Rev 01, (2016)*
- [17] *IAEA, Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation, Specific Safety Requirements SSR-2/2, Rev 01, (2016)*
- [18] *IAEA, Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants, Specific Safety Guide SSG-2, (2009)*
- [19] *IAEA, Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, Specific Safety Guide SSG-3, (2010)*
- [20] *IAEA, Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, Specific Safety Guide SSG-4, (2010)*

- [21] IAEA, *Safety Glossary, Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection, 2018 Edition, 2018*
- [22] IAEA, *Superseded safety standards, (2018)*
- [23] IAEA-TECDOC-1209, 2001, IAEA, *Risk Management: A Tool for Improving Nuclear Power Plant Performance*
- [24] *Safety Assessment Principles for Nuclear Plants, HSE Books, London, 1992*
- [25] IAEA INSAG-12, 1999, IAEA, *Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants: 75-INSAG-3 Rev. 1*
- [26] IAEA, *Defense in Depth in Nuclear Safety, INSAG-10, International Nuclear Safety Advisory Group, IAEA, Vienna, 1996*
- [27] IAEA *Safety Series 50-P-4, 1992, IAEA, Procedures for Conducting Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants (Level 1)*
- [28] IAEA *Safety Series 50-P-8, 1995, IAEA, Procedures for Conducting Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants (Level 2), Accident Progression, Containment Analysis and Estimation of Accident Source terms*
- [29] IAEA *Safety Series 50-P-12, 1996, IAEA, Procedures for Conducting Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants (Level 3): Off-site Consequences and Estimation of Risk to the Public*
- [30] WENRA, *Safety of new NPP designs, RHWG, (2013)*
- [31] WENRA, *SRL Safety Reference Level for existing reactor, RHWG, (Sept 2014)*
- [32] WENRA, *Practical elimination applied to new NPP designs - key elements and expectations, RHWG, (Sept 2019)*
- [33] USNRC, NUREG/CR-2300, 1983, *PRA Procedures Guide, A Guide to Performance of Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Plants, Final Report, Vol. 1: Chapters 1-8, Vol. 2: Chapters 9-13 and Appendices A-G*
- [34] USNRC, “An Approach for Using PRA in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis”, RG 1.174, Revision 3, January 2018
- [35] USNRC, “An Approach for Plant-Specific, Risk-Informed Decisionmaking: Inservice Testing”, RG 1.175, August 1998 (revised in 2018);
- [36] USNRC, “An Approach for Plant-Specific, Risk-Informed Decisionmaking: Graded Quality Assurance”, RG 1.176, August 1998 (revised in 2008);
- [37] USNRC, “An Approach for Plant-Specific, Risk-Informed Decisionmaking: Technical Specification”, RG 1.177, Revision 1, May 2011
- [38] USNRC, “An Approach for Plant-Specific, Risk-Informed Decisionmaking: Inservice Inspection of Piping”, RG 1.178, Revision 1, September 2003

(revised in 2018);

- [39] USNRC, "An Approach for Determining the Technical Adequacy of PRA Results for Risk-Informed Activities", RG 1.200, February 2000;
- [40] Fault Tree Handbook, USNRC, NUREG-0592, ML100780465, 1981
- [41] PRA Procedure Guide, USNRC, NUREG-2300, vol-1, 1983
- [42] PRA Procedure Guide, USNRC, NUREG-2300, vol-2, 1983
- [43] Handbook of Parameter Estimation for PRA, USNRC, NUREG-6823, ML032900131
- [44] Reliability Study, USNRC, NUREG-5500, Volumes 01-11
- [45] Guidance on the Treatment of uncertainties associated with PRA. PRA in Risk-Informed Decision Making (RIDM), USNRC-NUREG-1855, March 2009
- [46] Guidance on the Treatment of uncertainties associated with PRA. PRA in Risk-Informed Decision Making (RIDM), USNRC-NUREG-1855, Rev 01, March 2016
- [47] US-BNL (Brookhaven National Laboratory), Risk Importance Measures in the Design and Operation of Nuclear Power Plants, BNL-114389-2017-BC, I.Vrbanic, P. Samanta, 2017
- [48] USNRC, Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400 (NUREG-75/014) (October 1975)
- [49] Kaplan Stanley, John Garrick, .On the Quantitative definition of risk, 1981

**Автор:**

д-р Емил Кичев, ТУ-София, катедра ТЕЯЕ, ekichev@tu-sofia.bg