

# Вероятностная оценка безопасности (ВОБ)

## ВОБ становится полезным средством обеспечения безопасности реакторов

Луи Ледерман

Вероятностная методология в оценке надежности и безопасности занимает в настоящее время все большее место в ядерной энергетике и других областях. Закрывающаяся в этой методологии идея далеко не нова. Ее можно отнести к началу 40-х годов, когда она впервые была предложена для авиационной промышленности. В качестве параметра вероятностного события принималась тогда одна авария самолета на 100000 ч полетного времени.

В 1942 г. при изучении причин неудачи немецкой ракетной программы У-2 была принята концепция зависимости между частями системы, означавшая шаг вперед в понимании того, что любая система надежна только в той мере, в какой надежна ее самая слабая часть. Отсюда и возник логический и интегрированный подход к анализу систем. В течение последующих двух десятилетий первоначальные концепции совершенствовались и расширялись, включив и разработку статистических моделей для анализа неисправностей компонентов и теории надежности.

В 1960 г. с применением логического анализа в связи с программой „Аполло” Национального агентства по авиации и исследованию космического пространства (НАСА) этот подход получил дальнейшее развитие. Затем появился метод „эфекта вида аварии и анализа критичности”. В 1962 г. лаборатории фирмы Белл Телефоун в США использовали метод дерева ошибок при проведении для военно-воздушных сил США исследования по надежности запуска и управления ракетами „Минитмен”. В области ядерной энергетике впервые в 1967 г. Ф.Р. Фармер из Великобритании предложил предельное значение аварийных выбросов йода.

Первой работой по применению вероятностной методологии в оценке безопасности ядерных реакторов стал отчет WASH-1400, известный как „Исследование безопасности реакторов”. Эта работа была опубликована в 1975 г. и содержала анализ двух легководных реакторов (реактор с водой под давлением и реактор с кипящей водой) в свете вероятностей и последствий возможных аварий.

Данное исследование было проведено через 18 лет после первой попытки проанализировать последствия возможных катастрофических аварий на атомных электростанциях — исследования, известного как WASH-740. В нем рассматривались

последовательные стадии аварий на атомных электростанциях на основе субъективных вероятностей и был дан расчет последствий аварий за пределами площадки. Однако результаты исследования WASH-740 не нашли практического применения из-за отсутствия достаточных данных по проектам станций и очень ограниченного знания методов, необходимых для таких анализов.

По-другому получилось с исследованием WASH-1400, имевшем цель ответить на три основные вопроса вероятностной оценки безопасности:

- Что может выйти из строя?
- Какова частота аварий?
- Каковы последствия?

В WASH-1400 были применены новые методы анализа надежности, данные ядерной и неядерной промышленности, статистические модели, а также накопленные знания по феноменологии деградировавшей активной зоны, выбросам радионуклидов и последствиям аварии вне площадки. Были рассмотрены также аварии, вызванные ошибками человека и обычными причинами, и распространение неопределенностей, несмотря на ограниченные во время знания по этим вопросам.

К сожалению, сложность исследования и трудности в изложении результатов уменьшили возможности в оценке безопасности реакторов. Отчет был неправильно интерпретирован, особенно результат работы, известной под названием отчета Льюиса, подготовленной исследовательской группой Комиссии по регулированию ядерной деятельности (КРЯД) США. В результате, вероятностные методы стали предметом споров.

Авария на Три Майл Айлэнд в 1979 г. резко изменила ситуацию. Созданные после аварии исследовательские группы, особенно комиссия Кемени, большое внимание уделили вероятностным методам. В своем отчете комиссия Кемени рекомендовала „проводить глубокие исследования по вероятностям и последствиям (на площадке и вне ее) аварий на атомных электростанциях, включая последствия расплавления активной зоны в рамках официальной программы по обеспечению безопасности.”

Применение вероятностной методологии в оценках ядерной безопасности расширилось, когда было установлено, что в WASH-1400 содержится предвидение последовательностей, аналогичных тем, которые привели к аварии на АЭС Три Майл Айлэнд.

Г-н Ледерман — сотрудник Отдела ядерной безопасности Агентства.

**Проведенные исследования по вероятностной оценке риска (ВОР)**

Через десять лет после опубликования WASH-1400 и шесть лет после аварии на Три Майл Айленд вероятностный метод достиг стадии зрелости и стал полезным средством для оценки безопасности реакторов. Такие акронимы, как ВОР (вероятностная оценка риска), ВОБ (вероятностная оценка безопасности), ПМИБР (применение методологии к изучению безопасности реакторов), ВПОН (временная программа оценки надежности) и НПОН (национальная программа оценки надежности) стали частью повседневной лексики в области ядерной безопасности.

В некоторых странах проведено уже много исследований по ВОБ и еще больше находится в стадии выполнения. (МАГАТЭ считает ВОБ подходящим применением методов вероятностной оценки риска для принятия решений в области ядерной безопасности). В прилагаемой таблице показаны результаты некоторых из них.

Некоторые исследования финансировались правительственными организациями, как например, в случае с WASH-1400 в США и Немецким исследованием риска в Федеративной Республике Германии. Многие другие исследования проводились полностью на средства промышленности или как совместные предприятия.

Уровень этих исследований определялся необходимостью расширить охват проблем и значение изучения безопасности реакторов в плане ПМИБР. Имеются исследования конкретных станций (т.е. по ВПОН и НПОН).

Исследования были начаты также энергетическими компаниями, видевшими в этом средство подготовки эксплуатационного персонала и оценки опасностей для населения от установок, работающих вблизи густонаселенных районов.

В США исследование, проведенное на станции Биг Рок Пойнт, является примером решения первой задачи, а исследования на АЭС Зайон и Индиен Пойнт — примером решения второй задачи.

Хотя вероятностная оценка безопасности не является в большинстве стран составной частью процесса лицензирования, регламентирующим органом представляются на рассмотрение, как правило, законченные исследования; представленные результаты содействуют принятию решений по безопасности. Исследование по АЭС Лаймерик — первое исследование, проведенное в США в 1982 г. при содействии промышленности в связи с конкретным требованием лицензионного процесса. Позднее КРЯД США была представлена вероятностная оценка риска в качестве части Общего отчета по анализу безопасности стандартной электрической установки (GESSAR-П).

**Результаты исследований по ВАР — Частота расплавления активной зоны**

Станция	Мощность, МВт (эл.)	Тип реактора, поставщик СЯБ	Программа, начало осуществления	Вероятность расплавления активной зоны в год
Арканзас-1	836	PWR, B&W	IREP, 1981	$5 \times 10^{-5}$ *
Библис Б	1240	PWR, KWU	DRS, 1978	$4 \times 10^{-5}$ *
Биг Рок Пойнт	71	BWR, GE	Компания, 1981	$1 \times 10^{-3}$ *
Браунз-Ферри-1	1065	BWR, GE	IREP, 1981	$2 \times 10^{-4}$
Калверт Клифс-1	845	PWR, GE	RSSMAP, 1982	$2 \times 10^{-3}$
Кристал Ривер-3	797	PWR, B&W	IREP, 1980	$4 \times 10^{-4}$
Гранд Галф-1	1250	BWR, GE	RSSMAP, 1981	$4 \times 10^{-5}$ *
Индиен Пойнт-2	873	PWR, W	Компания, 1982	$4 \times 10^{-4}$ *
Индиен Пойнт-3	965	PWR, W	Компания, 1982	$9 \times 10^{-5}$ *
Лаймерик	1055	BWR, GE	Компания, 1982	$3 \times 10^{-5}$ *
Милстоун-1	652	BWR, GE	IREP, 1982	$3 \times 10^{-4}$
Милстоун-3	1150	PWR, W	Компания, 1983	$1 \times 10^{-4}$
Окобек-3	860	PWR, B&W	RSSMAP, 1980	$8 \times 10^{-5}$ *
Рич Боном-2	1065	BWR, GE	WASH-1400, 1975	$3 \times 10^{-5}$ *
Рингхак-2	800	PWR, W	SSPB, 1983	$4 \times 10^{-6}$
Сиброк	1150	PWR, W	Компания, 1983	$2 \times 10^{-4}$
Сиксаях-1	1148	PWR, W	RSSMAP, 1981	$6 \times 10^{-5}$ *
Шорхэм	819	BWR, GE	Компания, 1983	$4 \times 10^{-5}$ *
Сайтвэл Б	1200	PWR, W	CEGB, 1982	$1 \times 10^{-6}$
Сарри-1	788	PWR, W	WASH-1400, 1975	$6 \times 10^{-5}$ *
Янки Роув	175	PWR, W	Компания, 1982	$2 \times 10^{-6}$ *
Зайон	1040	PWR, W	Компания, 1981	$7 \times 10^{-5}$ *

Примечание. Таблица показывает, там где это необходимо, влияние внешних событий. Сравнение указываемых в ней величин следует проводить с крайней осторожностью. Используются различные модели, предположения и степени сложности. Данные, помеченные звездочками, — средние величины, остальные — точечные оценки.  
Источник: *Анализ риска*, том 4 (декабрь 1984 г.)

**Внимание практическим результатам**

На последних совещаниях выявились современные тенденции в вероятностной оценке безопасности. На международном совещании Американского ядерного общества (АЯО) и Европейского ядерного общества (ЕЯО) по вероятностным методам оценки безопасности и их применению (состоялось в Сан-Франциско в марте этого года) большое внимание уделялось практическому применению и реальной пользе исследований по ВОБ. Предыдущие совещания в этой области рассматривали главным образом вопросы методологии. Ниже излагаются основные моменты некоторых из 190 представленных докладов.

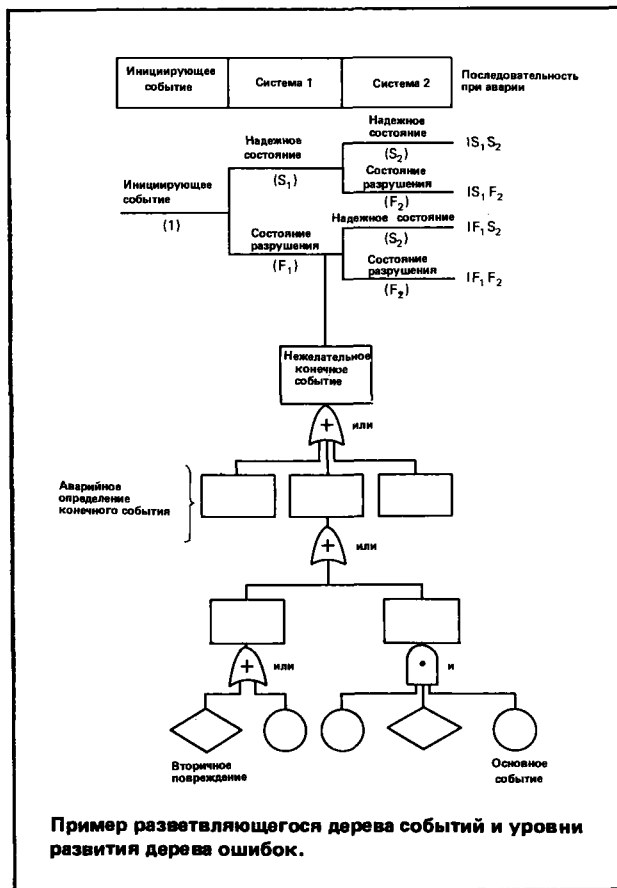
**Цели безопасности**

И в США, и в Европе изучаются вопросы достижения целей безопасности. Комиссия по регулированию ядерной деятельности США проводит работы по оценке безопасности с 1983 г., и в ее программном заявлении по этому вопросу говорится, что цели безопасности можно использовать в процессе регламентирования для совершенствования традиционных методов изучения безопасности. Однако это заявление предостерегает, что эти цели не должны использоваться в регламентирующих рамках строгих критериев принятия или непринятия. В Европе первые выводы специальной комиссии, созданной в 1983 г. для изучения этой проблемы, оказались еще более осторожными. Цели безопасности, связанные с анализом риска, могут служить руководством при разработке соответствующих правил, хотя и неясно в настоящее время, как это сделать.

**Совершенствование баз данных**

В некоторых докладах совещания АЯО/ЕЯО рассматривались ключевые базы данных, относящихся к исследованиям по ВОБ, и сообщалось об очень обнадеживающем положении, особенно по сравнению с положением, когда проводилось исследование WASH-1400 при недостатке данных в промышленности.

База данных (Std. 500 1984 г.) Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) проделала большой путь, прежде чем стала стандартом для анализа риска и надежности на атомных электростанциях. Значительные изменения с 1983 г. в охвате и структуре системы данных по надежности атомных электростанций (NPRDS), принадлежащей Институту эксплуатации в ядерной энергетике (INPO), указывают на то, что она вполне может стать в будущем важным источником данных. В нее будут последовательно и широким потоком поступать данные от всех действующих атомных электростанций, и она будет предоставлять доступ в режиме „on-line” для ввода данных и для их поиска.



Пример разветвляющегося дерева событий и уровни развития дерева ошибок.

Рассматривалось также функционирование Европейского банка данных по надежности – централизованной системы, собирающей и обрабатывающей информацию по работе легководных реакторов. Внимание было обращено на ту роль, которую могут играть такие методы искусственного интеллекта как язык, экспертная система и нечеткая логика в увеличении возможностей четырех банков данных, составляющих систему: банк данных по случаям с компонентами, эксплуатационные отчеты о состоянии установки, система отчетов об аномальных случаях и банк данных по параметрам надежности.

Сообщалось о программе сбора и анализа данных по ошибкам человека, осуществлявшейся с 1982 г. совместно Электрисите де Франс и INPO, и среди указанных в этом сообщении проблем можно назвать: познавательные факторы в ошибках человека, количество и характер случающихся неисправностей, интервал времени между случаями неисправностей, выявление и характеристика причин, ведущих к неисправностям.

**Применение: положительные данные**

На упомянутом совещании промышленностью и регламентирующими органами были представлены

чрезвычайно позитивные доклады по ВОБ. Энергетические компании сообщили о своих возможностях выполнять, использовать и поддерживать модели ВОБ на своих станциях. Использование ВОБ в деле обеспечения безопасности и в качестве инструмента для принятия решений в области технологии и эксплуатации было представлено как часть „интегрального плана” модификаций станции и бюджетных ассигнований.

Что касается конкретных регламентационных применений, то в докладах указывалось на вероятностный анализ теплового удара под давлением, помогающий КРЯД решать эту проблему. В частности, такой анализ помогает идентифицировать важные последствия, ведущие к сквозному растрескиванию стен, и определить действия оператора и меры по управлению.

Обсуждались также упражнения на стенде, моделирование зависимых событий, анализ чувствительность/неопределенность, разработка компьютерных кодов, включая применение микро-ЭВМ, базис надежности для ограничительных условий эксплуатации, анализ параметров источника выброса и последствий.

### Математическое обеспечение ВОБ, руководства и ресурсы

Со времени опубликования WASH-1400 много сделано в области разработки методологии ВОБ. Изучались проблемы, сформулированные в обзоре Льюиса. К ним относятся: анализ надежности действий человека, идентификация и обработка неопределенностей, связанных с параметрами; моделирование и законченность; сбор и обработка данных, необходимых для исследований по ВОБ.

Что касается программ ЭВМ, то они имеются в значительном разнообразии для количественной оценки крупных деревьев ошибок и деревьев событий, идентификации общих аварий, анализа распространения неопределенностей. Разработаны или разрабатываются коды для обработки данных по феноменологии деградировавших активных зон, поведению защитной оболочки реактора, последствиям аварии за пределами площадки. Большое внимание уделялось тем проблемам, которые не были охвачены WASH-1400, в частности, анализу пожароопасностей и обработке внешних событий, инициирующих аварии. Несколько исследований, выполненных в этой последней области, показывают, что, в частности, землетрясения представляют опасность.

За последние годы появилась масса работ по ВОБ. Помимо опубликованных подробных докладов по ВОБ с описанием методологии и полученных результатов, выпущено много специализированных отчетов регламентирующих органов и национальных лабораторий.

Различные руководства обосновывают процедуры проведения ВОБ. В январе 1983 г. в США было

опубликовано руководство IREP. Одновременно КРЯД США, Институт электроэнергетических исследований (EPRI), Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) и Американское ядерное общество (АЯО) выполнили большую работу, выпустив „Руководство по процедурам ВОБ”. Это — руководство по методам проведения ВОБ. В нем определяются уровни исследований по ВОБ, на которые делаются ссылки. Уровень 1 включает анализы систем, позволяющих делать оценки частоты расплавления активных зон. Уровень 2 включает анализы защитной оболочки реактора в связи с выбросами. Уровень 3 обеспечивает полную оценку опасностей для населения в связи с последствиями аварии вне станции (вне площадки).

### Перспективы, возможности

Применение ВОБ в деле обеспечения безопасности реакторов раскрыло огромные возможности этих методов, в частности, в изучении технических проблем в ситуациях, когда только один детерминистский подход недостаточен. Чем больше знаний будет приобретено в результате исследований по ВОБ, тем шире будут использоваться методы ВОБ энергетическими компаниями и регламентирующими органами.

Специальными областями применения ВОБ являются: идентификация систем и компонентов, имеющих значение для безопасности; оценка технических спецификаций, включающих ограничительные условия эксплуатации (ОУЭ); обоснование, включая анализ экономической эффективности; подготовка операторов, персонала станции и властей; оценка конструкции, включая общие неисправности и ошибки человека; идентификация, оценка и ранжирование проблем безопасности; планирование готовности к авариям; определение инспекционной деятельности; деятельность по ликвидации аварии; моделирование сценария аварии; программа испытаний, технического обслуживания и ремонта; соответствие целевым величинам; контроль риска.

Кроме того, государственные и промышленные организации осуществляют различные исследовательские программы с целью решить проблемы, возникающие при применении ВОБ. Среди таких проблем: идентификация и обработка неопределенностей; значительная роль суждений почти во всех аспектах оценки надежности деятельности человека; расхождения в определении частоты общих неисправностей и принятых средств анализа; успехи методологии, необходимые для анализа взаимодействий систем; крупные неопределенности, связанные с расчетными опасностями от внешних воздействий; характеристика неопределенностей параметров источника выброса.

На разработку общих критериев лицензирования, в частности, спорного применения целей безопасности, значительное влияние оказывают политические и психологические проблемы общего уровня приемлемого риска. К счастью, большая часть применений ВОБ не зависит от результата продолжающихся дискуссий, и потому можно продолжать пользоваться ВОБ в деле обеспечения безопасности реакторов.

В общем, следует отметить, что ВОБ не является средством представления накопленных знаний в вероятностной схеме. Скорее это признанное и эффективно используемое средство технического исследования в области безопасности реакторов, позволяющее приобрести связанные с безопасностью знания, которые невозможно получить другими средствами.

### ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ АГЕНТСТВА ПО ВОБ

Программа МАГАТЭ в этой области концентрируется на трех различных аспектах:

- Направление работ от оценок всех видов опасности к идентификации доминирующих последовательностей при авариях, к анализу надежности систем, важных для безопасности

- Инициирование программ по ВОБ во многих государствах-членах

- Влияние ВОБ на принятие решений

В этом контексте было недавно начато осуществление межрегиональной программы с целью координирования учебной деятельности и создания при органах регламентирования ядерной деятельности в развивающихся государствах-членах групп, способных делать вероятностные оценки безопасности.

Другие виды деятельности включают:

- *Подготовку технических отчетов.* Они готовятся по ВОБ и опыту эксплуатации, положению дел и перспективам разработки количественных целей безопасности, идентифи-

кации последовательности при авариях, связанных с ошибками человека; и ВОБ технических систем безопасности.

Готовящийся документ по применению ВОБ для принятия решений по безопасности восполнит, как предполагается, значительный пробел в этой области. В конкретном плане он поможет стандартизации методов, а также применению и интерпретации результатов ВОБ.

- *Исследовательские проекты.* В 1982 г. начала осуществляться координационная исследовательская программа по разработке критериев риска для ядерного топливного цикла с участием 17 стран

- *Обучение и поддержка.* МАГАТЭ организует короткие курсы в связи с потребностью администраторов применять ВОБ в своей деятельности. Уже проводятся раз в год семинедельные курсы для аналитиков и предполагается выпустить руководство по проведению ВОБ и правильному применению их результатов. В Вене для государств-членов создаются компьютерные коды для применения ВОБ

