

СТАТЬИ

О развитии атомной энергетики с позиции ее безопасности

Б.Г. Гордон, директор НТЦ ЯРБ, профессор МИФИ

За 20 лет после Чернобыльской аварии отношение к развитию атомной энергетики в мире было различным. Одни страны накладывали мораторий на сооружение АС, другие – выводили из эксплуатации уже действующие атомные энергоблоки, третьи – продолжали реализовывать ядерные программы, преодолевая сопротивление части общества. Научно обоснованные и согласованные мировым сообществом специалистов оценки последствий аварии содержатся в [1]. Информация, из которой вытекают эти оценки, открыта и известна, например, [2]. Дело не в том, что человечество оправилось от шока Чернобыльской аварии, а в постепенном понимании научной общественностью, что воздействия и последствия ее во многом обусловлены не столько аварийными техническими и физическими процессами, сколько ошибочными организационными и административными мероприятиями, многократно усиленными неадекватным восприятием, связанным с некомпетентным освещением их в СМИ.

Вместе с тем неравномерное распределение углеродосодержащего топлива по планете, рост потребностей общества в электроэнергии, повышение эффективности действующих АС, практически безаварийная их работа в последние 20 лет привели к тому, что ряд стран объявил о своих амбициозных планах развития национальной энергетики с опережающим строительством АС. Китай, Индия, Украина, Иран заявляют о своей приверженности атомной энергетике. Они предполагают построить у себя от 6 до 30 новых энергоблоков, хотя понятно, что один энергоблок в Финляндии может дать больший вклад в национальную энергосистему, чем 30 – в Китае.

Можно указать ряд существенных стимулов развития ядерной технологии. **Инерция** развития, когда имеющаяся инфраструктура (машиностроение, энергосети, кадры, города и т.п.) требует своего замещения и роста. **Государственная политика**, учитывающая престижность ядерной технологии, стремление через ядерный клуб войти в сообщество развитых государств, камуфляж ядерной энергетикой военных программ. **Экономика** – независимость от экспорта углеродосодержащего топлива, коммерческая привлекательность ядерной энергетики в ряде районов. **Экология** – исключение выбросов окислов углерода, серы, азота, предотвращение парникового эффекта. Не за горами и такой стимул, как **отсутствие иных альтернатив**, когда по мере исчерпания углеродосодержащего топлива атомная энергетика окажется единственной реализуемой в необходимых масштабах и обеспеченной ресурсами энергетической технологией.

Пока же одни страны рассматривают собственную атомную энергетику как свидетельство высокого уровня национальных технологий, другие надеются обеспечить собственную независимость от экспорта энергоносителей, для третьих АС – это пароль для входа в следующий класс развитых государств. В общем, при множестве внутренних интенций атомная энергетика в мире стоит на пороге очередного витка своего развития. И очень бы хотелось, чтобы это развитие не сопровождалось серьезными авариями, ставящими под сомнение его технологическую основу.

Рассмотрим, на каких проектах энергоблоков такое развитие возможно, каковы особенности тех типов реакторов, которые можно реально сооружать в первой половине XXI века. В настоящее время на разных стадиях разработаны проекты корпусных реакторов AP-600 и AP-1000 в США, EPR-1500 в Европе, АС-91, 92 и ВВЭР-1500 в России. Для целей настоящей статьи неважно, что существуют также современные проекты кипящих реакторов типа ABWR и усовершенствованные проекты канальных реакторов CANDU.

Главное – все эти реакторы рассчитываются на срок эксплуатации 40-60 лет с возможностью последующего продления до 100 лет. И то, что частота тяжелой запроектной аварии, при которой возможно сверхнормативное повреждение активной зоны, оценивается в 10^{-5} - 10^{-6} событий на реактор в год. Эта величина является интенсивностью потока событий в единицу времени, называется частотой плавления активной зоны (ЧПЗ), обозначается λ , и при сегодняшнем уровне развития науки о ядерной безопасности рассчитывается вероятностными методами анализа безопасности (ВАБ) с погрешностью около порядка.

В области использования атомной энергии различают ВАБ-1 – расчет вероятностей тяжелой запроектной аварии, после которой эксплуатация объекта навряд ли осуществима, ВАБ-2 – расчет вероятностей сверхнормативного выброса радиоактивных веществ за пределы гермоограждения АС и ВАБ-3 – расчет вероятностей облучения персонала и населения. Первые две методики рассчитывают вероятность события, приводящего к прекращению эксплуатации – смерти объекта. Третья методика позволяет довести расчеты до количественной оценки вероятности смерти людей. Методы ВАБ основываются на базах данных об отказах оборудования, из которого состоит АС. Прослеживая цепочку событий, сопровождающихся возможными отказами и учитывая вклад ошибочных решений персонала, ВАБ позволяет рассчитывать вероятность серьезной аварии с плавлением зоны по различным сценариям.

ВАБ-1 оценивает величину вклада ошибок персонала в общую ЧПЗ в диапазоне 40-60 %. То есть основной комплексный показатель ВАБ как бы примерно одинаково зависит от надежности оборудования и надежности персонала, причем последняя определяется экспертными методами. Мы делаем массу усилий по уточнению половины технических исходных событий и пока не знаем, как подступиться к уточнению другой половины. Хотя в крупнейших авариях на Три-Майл Айленд и Чернобыльской АС прояви-

лась низкая культура безопасности оперативного персонала. Именно этим обстоятельством отчасти объясняются неопределенность и низкая точность вероятностных расчетов, недоверие многих специалистов к их результатам. Речь идет не о нормативном запрете оператору в течение 10-30 мин вмешиваться в работу систем безопасности, а об исходных событиях аварии, связанных с ошибочными решениями оператора.

Пока это неустранимый дефект вероятностных анализов, не позволяющий принимать на веру абсолютные значения результатов ВАБ, что, впрочем, не мешает использовать его достоинства для сопоставления ЧПЗ различных состояний энергоблоков и даже, при соблюдении определенных условий, различных энергоблоков между собой. В этих случаях надо строго выдерживать единство методик расчетов, содержания баз данных, начальных и граничных условий и, что немаловажно, – состава команды, выполняющей расчеты.

Есть одно существенное отличие между анализами, выполняемыми для действующих и для проектируемых энергоблоков. В первом случае база данных отказов учитывает не только заводские испытания оборудования, но и опыт его эксплуатации на объекте. При ВАБ проектируемых энергоблоков опыта эксплуатации самого объекта, разумеется, нет, некоторое оборудование может также еще проектироваться, и его надежность **назначается**, исходя из опыта эксплуатации прототипов и аналогов.

Это обстоятельство облегчает сопоставление энергоблоков между собой и приводит к тому, что результаты ВАБ проектируемых блоков, как правило, дают значение ЧПЗ меньшее, чем те, которые впоследствии будут получены, исходя из данных эксплуатации. Такие примеры хорошо известны специалистам и являются еще одной из причин скептицизма по отношению к вероятностным методам, так как явно свидетельствуют о недостатках наших знаний. И хотя сегодняшнее состояние вероятностных методов накладывает ряд ограничений на их распространение [3], эти недостатки постепенно устраняются.

В настоящее время ВАБ – дополнительный к детерминистскому анализу инструмент оценки безопасности энергоблока. Но детерминистский анализ позволяет только констатировать обеспеченность безопасности и не дает количественных показателей для сопоставления различных состояний энергоблока или энергоблоков между собой. Тогда как ВАБ рассчитывает такой комплексный показатель – ЧПЗ с учетом и результатов детерминистского анализа, и опыта эксплуатации конкретного энергоблока или его аналогов. По крайней мере, для проектируемых энергоблоков можно установить ряд общих граничных условий, позволяющих по величине ЧПЗ сопоставлять различные типы реакторов, использующих разные теплоносители, конструкции активных зон, системы безопасности и т.п.

Учитывая эти обстоятельства, можно оценить вероятность тяжелой запроектной аварии на одном проектируемом энергоблоке АС P_1 , используя результаты расчета частоты плавления зоны λ . Воспользуемся хорошо известной в теории вероятностей формулой для функции распределения простейшего потока в теории массового обслуживания [4]:

$$P_1 = 1 - \exp(-\lambda\tau). \quad (1)$$

График этой функции представлен на рис. 1. В соответствии с этой зависимостью протекают многие явления природы в так называемом регулярном режиме [5], происходит деградация оборудования [6] и т. д.

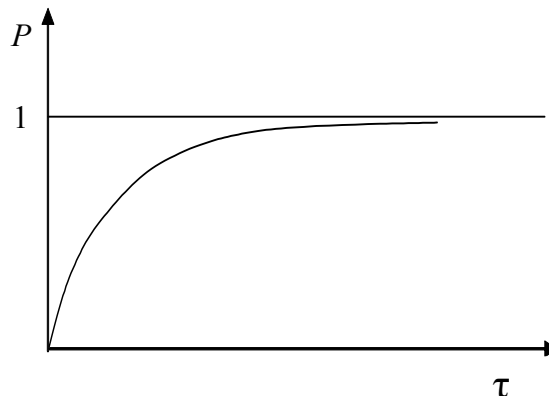


Рис. 1

Выражение (1) разлагается в ряд, и при $(\lambda\tau) < 0,01$ функция упрощается:

$$P_1 = \lambda\tau. \quad (2)$$

Из рис.1 видно, что при малых аргументах вероятность прямо пропорциональна времени. То есть по (1) или (2) можно рассчитать вероятность тяжелой запроектной аварии для одного действующего энергоблока, если предоставить его самому себе: не ремонтировать, не модернизировать, не повышать квалификацию персонала и т.п., или пока объект находится в проекте. На эксплуатируемом блоке все эти действия приводят к новому значению λ , рассчитываемому на период не более одного года.

Рассмотрим изменение вероятности тяжелой запроектной аварии за время эксплуатации одного энергоблока АС, P_1 . Если результаты проектного ВАБ дали величину λ_A , равную, скажем, 10^{-5} событий на реактор в год, то тогда в процессе эксплуатации вероятность аварии будет расти по линии AB , как показа-

но на рис. 2, с использованием проектного значения λ_A , хотя, повторяю, оно было рассчитано только на один год.

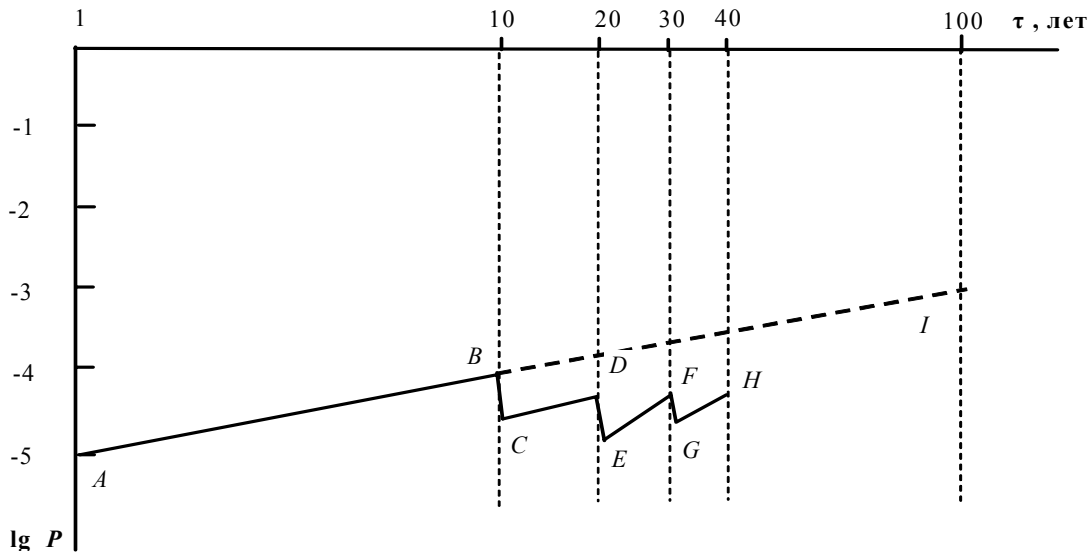


Рис. 2

Если эксплуатирующая организация имеет лицензию на какой-то срок, скажем, на 10 лет, то по его истечении вероятность аварии в момент B достигнет 10^{-4} . К нему могут быть приурочены модернизации энергоблока, после которых ВАБ даст новое значение частоты $\lambda_C > \lambda_A$, и последующие 10 лет вероятность аварии будет расти по линии CD и так далее. Строго говоря, линии BC, DE на рис. 2 не вертикальны, а слегка наклонны, так как на модернизацию затрачивается время. Величины же $\lambda_C, \lambda_E, \lambda_G$ рассчитываются ВАБ уже для эксплуатируемого энергоблока. То есть результаты расчетов по (1) и (2) дают как бы наилучшую, консервативную оценку вероятности аварии для проектируемого блока на период его срока службы (линия AI на рис. 2).

Следует подчеркнуть, что ВАБ рассчитывает частоту тяжелой запроектной аварии для одного энергоблока в течение одного года λ_0 . Это связано с тем, что статистические данные об отказах оборудования, лежащие в основе исходной информации ВАБ, относятся к конкретному энергоблоку и определяются за год. При проектировании какого-то типа реакторов можно рассчитывать λ_0 для каждого из семейств этого типа реакторов, пренебрегая на первом этапе различиями в площадке.

Следует обратить внимание на принципиальное отличие в подходах к расчету вероятностей аварий и летальных исходов. Смерть человека закономерна и детерминирована. Утверждение, что каждый человек смертен, – пример абсолютной истины, вытекающей из опыта. Вероятность смерти, как правило, рассчитывается ретроспективным статистическим анализом по количеству произошедших смертей в возрастных когортах, на которые условно делится популяция. Вероятностный анализ позволяет рассчитывать, когда произойдет детерминированное событие – смерть, то есть насколько вредные воздействия уменьшают среднестатистическую величину продолжительности жизни, равную для России 58-68 лет.

Авария же отнюдь не необходима. За время жизни объекта 40-60 лет она может, но не должна наступить. Вероятность аварии – это прогностическая оценка наступления возможного события с заранее зафиксированными последствиями – тяжелое повреждение активной зоны реактора. И вероятностный анализ дает значения вероятностей события – смерть энергоблока, которое недетерминировано и которое можно и необходимо предотвратить, по крайней мере, за время эксплуатации объекта. Количественно эти соображения выражаются следующим образом. Смерть, как и авария, может произойти в любой период жизни, но по мере повышения возраста популяционных когорт вероятность смерти стремится к единице. У объекта же вероятность аварии также возрастает по мере эксплуатации по линии AI рис. 2 до величины, значительно меньшей единицы, зависящей от условий эксплуатации, наличия модернизаций и т.п.

Теперь с учетом всего сказанного о недостатках современного ВАБ, о необходимости его совершенствования, об осторожности использования его результатов за пределами временного диапазона, на котором имеются базы данных об отказах попробуем распространить его на энергосистему, состоящую из N однотипных энергоблоков, для которых проектный ВАБ дает одинаковую величину λ_0 . В этом случае вероятность тяжелой запроектной аварии во всей энергосистеме:

$$P_N = \sum_{i=1}^N P_i = N\lambda_0\tau, \quad (3)$$

так как события на разных блоках независимы друг от друга. Таким образом, при ЧПЗ проектируемых энергоблоков порядка 10^{-5} событий на реактор в год, сроке службы 50 лет в энергосистеме из 20 реакто-

ров вероятность тяжелой запроектной аварии хотя бы на одном из них составит 10^{-2} . Отметим, что при полученном значении как раз еще выполняется допущение перехода от уравнения (1) к (2).

Оценивая масштаб этой величины, напомним, что вероятность угадать 5 чисел из 35 составляет $2 \cdot 10^{-6}$. И, как известно, время от времени такие выигрыши происходят. Не думаю, что общество признает вероятность аварии в энергосистеме в 1% приемлемой. Можно возразить относительно полученного результата: в США работают более 100, а во Франции – более 50 реакторов. В [3] проведен подобный расчет оценки вероятности тяжелой запроектной аварии на 10^4 реакторолет, которые наработала вся мировая энергетика к 2002 г., что вполне соответствует практике: за этот период в ней произошли две упомянутые выше аварии (Чернобыль и Три-Майл Айленд).

Вывод об увеличении вероятности аварии с ростом количества объектов очевиден, но не общепринят. Зачастую статистические значения **произошедших** смертей сопоставляются с вероятностными расчетами **возможных** аварий. Ведь вероятность возможных смертей – это произведение вероятности аварии на другие вероятности – летальных исходов в зависимости от того, какие рассматриваются эффекты: детерминированные или стохастические, учитываются ли отложенные смерти, накопление радионуклидов и другие немаловажные особенности воздействия радиации на окружающую среду и человека.

Названные в начале статьи различные типы энергоблоков относятся к семействам эволюционных реакторов, для проектов которых $\lambda_0 \sim 10^{-6}$. К тому же в странах, предполагающих широко развивать атомную энергетику, остро встанет вопрос о культуре безопасности персонала, привлекаемого к управлению реакторами. Упомянутая неопределенность, связанная с человеческим фактором и другими особенностями ВАБ, может повысить эту величину до $\sim 10^{-5}$, которую мы использовали для оценок.

Человеческому фактору зачастую придают расширительное толкование: вообще влияние человека на технику (конструкторов, строителей, операторов). Мы же используем его в узком смысле: влияние операторов и администрации АС на безопасность. Нельзя забывать, что **развитие атомной энергетики потребует подготовки специально обученных, дисциплинированных людей, от которых во многом будет зависеть безопасность АС**. То есть пропорционально должна развиваться там, где она есть, или создаваться специальная система образования людей, обладающих культурой безопасности. Культура безопасности предполагает приоритет обеспечения безопасности перед любыми иными стремлениями человека и базируется на общей культуре народа. Так что развитие атомной энергетики становится крупной государственной и социальной задачей.

Здесь уместно привести цитату из одной из последних статей В.А. Легасова [7]: "Спроектированный по техническим средствам и регламентным требованиям объект, достаточно надежный в условиях малого тиражирования, теряет статистически надежность при массовом воспроизводстве, хотя физического облика он при этом не меняет". Так вот в атомной отрасли статистическая надежность объекта снижается еще и потому, что к управлению им должен привлекаться специально обученный персонал, обладающий трудновоспитуемым свойством – культурой безопасности.

В [3] рассмотрен вопрос, какой должна быть величина ЧПЗ для новых революционных типов реакторов, авария на которых не приводит к превышению нормативных критериев радиационной безопасности, чтобы считаться безусловно приемлемой для безопасности по сравнению с другими технологиями энергопроизводства. Полученное значение 10^{-9} с сегодняшней точки зрения на возможности ВАБ представляется нереальным. Когда говорится о несовершенстве ВАБ, имеется в виду, что у любого инструмента есть своя разрешительная способность. Линейкой нельзя измерить длины менее нескольких миллиметров. ВАБ еще предстоит доказать пределы своих возможностей для расчетов таких малых значений. Дело будущего – усовершенствовать ВАБ для расчетов столь ничтожных вероятностей.

Подводя итоги сказанному выше, можно заключить, что эволюция реакторов, прототипы которых создавались для военных целей, ведет в тупик. На базе одних эволюционных реакторов, подобных тем, что эксплуатируются ныне, нельзя планировать экстенсивное широкомасштабное развитие атомной энергетики. Основание для такого вывода – не столько нехватка урана и персонала, проблемы с отходами и распространением ядерных материалов, сколько недостаточная защищенность от тяжелых аварий. **Повышая количество эволюционных реакторов, особенно в странах, где нет традиций культуры безопасности, атомная энергетика становится ее заложницей. Или наложницей, которая время от времени "производит" тяжелые аварии, что пока трудно вообразить. Эволюционными реакторами можно замещать уже существующие мощности там, где они есть. Целесообразно воздержаться от широкомасштабного развития энергетики на базе эволюционных реакторов в тех странах, где их еще нет. Все силы ядерного сообщества следует направить на поиск конструкций революционных реакторов, на их НИР и ОКР, пока еще есть время и надежды на успех.**

Атомная энергетика должна разорвать пуповину, связывающую ее с военным лоном, из которого она вышла. Хотя военные технологии зачастую – локомотив научно-технического прогресса, пришло время перевести ядерную технологию на отдельные рельсы. Только став самостоятельной энергетической технологией, построенной на базе детерминистски безопасных реакторов, она сможет обеспечить человечество экологически чистой и безопасной энергией на долгие годы.

Я очень не хотел бы прослыть ретроградом, не верующим в будущее нашей отрасли. Напротив, убежден, что у человечества пока не видно иной перспективы широкомасштабного производства электроэнергии, кроме ядерной технологии. Но именно потому, что обеспечение безопасности – первый приоритет атомной энергетики, хотелось бы, чтобы возможность любой серьезной аварии на АС была бы предотвращена даже за счет более медленного развития.

Когда идешь над пропастью, надо чаще глядеть под ноги. Опасно смотреть назад и вниз так же, как вперед и вверх. Нам всем еще предстоит выработать верный взгляд на будущее отрасли.

Литература

1. Наследие Чернобыля: Медицинские, экологические и социально-экономические последствия и рекомендации правительствам Беларуси, Российской Федерации и Украины. Чернобыльский форум. Отчет ООН. Вена, 2005.
2. Социальные, экономические, экологические и медицинские последствия, обусловленные авариями на ПО "Маяк" и 4-м блоке Чернобыльской АЭС. Обзор по материалам открытых публикаций. -М.: НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России, 2003.
3. Гордон Б.Г. Идеология безопасности. -М.: НТЦ ЯРБ, 2006.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. -М.: Наука, 1969.
5. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. -М.: ГИТТЛ, 1954.
6. Острейковский В.А. Эксплуатация атомных станций: Учебник для вузов. -М.: Энергоатомиздат, 1999.
7. Легасов В.А. Проблемы безопасного развития техносферы//Коммунист. 1987. -№ 8.

Уважаемые читатели!

В первом квартале 2006 года в серии "Труды НТЦ ЯРБ" выходит книга Б.Г. Гордона "Идеология безопасности" объемом 240 с. с илл.

Книга представляет собой попытку анализа представлений, связанных с понятием безопасность: угроза, авария, вероятность, ущерб, риск. В системе этих понятий предложены классификации важнейших из них. Рассмотрены конкретные примеры существующих методов их расчета, и, исходя из практики обоснований использования атомной энергии, намечены пути совершенствования количественных методов оценок безопасности, методик расчета вероятностей и риска аварий.

Цена – 300 руб.

Заявки на приобретение книги можно высылать:

по адресу: 107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, стр. 5, НТЦ ЯРБ;

по факсу: (495) 264-28-53.

Справки по телефону: 264-28-59.