

## ТК МАГАТЭ по применению вероятностного анализа безопасности для предотвращения, смягчения последствий и управления тяжелыми авариями

В совещании, состоявшемся в сентябре 1989 г. в Мадриде (Испания), участвовали специалисты Великобритании, Индии, Испании, Италии, Пакистана, СССР, США, Франции, ФРГ, Швейцарии, Швеции, Японии.

Цель совещания состояла в том, чтобы рассмотреть состояние и тенденции в методологии использования вероятностного анализа для экспертизы безопасности проектов ядерных энергетических установок, оценить эффективность намечаемых модернизаций и акцентировать внимание на возможностях этого анализа для управления тяжелыми авариями и смягчения их последствий.

Проектная безопасность ЯЭУ в настоящее время базируется на концепции «защиты в глубину», характеризуется непревышением некоторых физических критериев для перечня событий, согласуемых разработчиком и регламентирующим органом, и демонстрируется детерминистским анализом. Наиболее важными характеристиками общепринятой концепции защиты в глубину являются ряд последовательных физических барьеров, необходимый состав инженерных систем безопасности и систем диагностики и защиты, которые должны быть спроектированы с учетом избыточности и разнообразия.

Дополнительный вероятностный анализ безопасности ЯЭУ, получивший в последнее время всеобщее признание, предполагает прежде всего:

- анализ проектных решений (в том числе оценку модификаций) с целью выявления тех или иных недостатков проектных решений и выяснения слабых мест эксплуатируемых объектов;

- оценку относительной значимости систем или их компонентов в общем риске;

- оценку ошибки человека и сферы его вмешательства в системы АЭС;

- расчет интегрального показателя безопасности ЯЭУ, характеризующего вероятность некоторого серьезного последствия, в качестве которого чаще всего принимается суммарная частота всех последовательностей, приводящих к плавлению активной зоны.

В качестве целевого критерия этого интегрального показателя в большинстве стран принимается значение  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  год<sup>-1</sup>. Причем, естественно, индивидуальные последовательности должны иметь частоту в 10—100 раз меньше.

Следует заметить также, что интегральный показатель частоты возможного плавления активной зоны не может быть достаточно полным критерием безопасности, так как неадекватно характеризует риск неконтролируемых выбросов в окружающую среду. Например, как показала оценка потенциальной эффективности вентиляции защитной оболочки испанских АЭС, установка такой системы на BWR с оболочкой Mark I уменьшит частоту разрушения зоны приблизительно на 30% и риск от неконтролируемых выбросов в окружающую среду в 2 раза, а вентиляционная система в BWR с защитной оболочкой Mark III — частоту разрушения зоны на 2% и риск в 7 раз.

И тем не менее, несмотря на ничтожно малую вероятность подобных тяжелых событий, аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» и Чернобыльской АЭС так же, как и менее значимые инциденты, говорят о том, что тяжелые аварии, включающие разрушение активной зоны и выброс радиоактивных веществ, должны рассматриваться как реальная возможность. Поэтому наряду с обязательной реализацией и дальнейшим усовершенствованием принципа защиты в глубину, развитием принципов внутренней самозащитенности соответствующее внимание необходимо уделять и стратегии управления тяжелыми авариями.

Целью такого управления является разработка мер и средств по предотвращению тяжелых аварий (разрушение и расплавление активной зоны реактора) и смягчению возможных последствий (радиационного воздействия), что должно обеспечить желаемые запасы для выбранных критериев безопасности, исходя из консервативных подходов к проектированию систем и объекта в целом на основе строгих лицензионных расчетов и общественной приемлемости данного подхода.

Как показывает анализ таких тяжелых запроектных аварий, в большинстве случаев имеются достаточные (до возможного разрушения активной зоны) запасы времени, которые можно было бы использовать для принятия превентивных мер по управлению аварией путем введения в действие эксплуатационных систем, систем безопасности и внешних устройств. Если средства управления авариями хорошо подготовлены и эксплуатационный персонал прошел обучение по их применению, то риск от аварий может быть значительно снижен даже с учетом того, что реально в эксплуатируемых установках такими средствами могут быть только технические, спроектированные для смягчения последствий основных проектных аварий. И в этом плане признается, что методы и средства вероятностного анализа необходимы и полезны в оценке эффективности принимаемых решений по разработке тех или иных средств управления авариями.

Предотвращение тяжелых аварий должно обеспечиваться насколько возможно:

- развитием и реализацией в проектах принципа внутренней самозащитенности;

- учетом более полного перечня исходных событий; совершенствованием систем диагностики и защиты; минимальной избыточностью и разнообразием систем безопасности и анализом использования вспомогательных систем;

- исследованием последовательностей эксплуатационных ошибок, чтобы представлять особенности их предотвращения;

- совершенствованием культуры безопасности операторов, предполагающей их высокий уровень квалификации и обучения, а также эксплуатацию станции в установленных регламентом режимах.



Областью вероятностного анализа безопасности в оценке эффективности этих мероприятий является уменьшение вероятности 1) вступления установки в состояние наилучшей тяжести и 2) последовательностей тяжелых аварий, приводящих к наиболее тяжелым выбросам радионуклидов. При этом необходимо принимать во внимание реальные условия эксплуатации, с тем чтобы иметь возможность учесть надежность конкретных систем безопасности, определить стратегию профилактического ремонта и периодических испытаний. И именно в направлении индивидуальной проверки установок проводится вероятностный анализ безопасности АЭС в США и Швеции. Первая часть вероятностных программ проверки уязвимости установок относится к внутренним событиям, вторая связана с внешними событиями. Выполненный с использованием NUREG-1150 вероятностный анализ безопасности пяти типичных АЭС США показал, что потенциальные уязвимости могут быть идентифицированы и возмещены превентивными мерами. Эти меры по своим целям классифицированы на три категории:

сохранение и пополнение таких ограниченных ресурсов, как вода, воздух и электроэнергия;

использование для расхолаживания вспомогательных станционных систем (например, пожарные системы);

аннулирование перекрещивающихся связей и защитных соединений (пускателей, кнопок и т. д.).

Разработка систем, специально относящихся к предотвращению тяжелых аварий, находится еще на очень ранней стадии рассмотрения.

Стратегия смягчения последствий возможных тяжелых аварий связывается в настоящее время с сохранением целостности защитной оболочки, стремлением захлопотать активную зону внутри защитной оболочки (внутри или вне корпуса реактора) и уменьшением выброса радионуклидов за пределы защитной оболочки. Данные цели могут достигаться при помощи систем подавления и сброса давления в защитной оболочке, дополнительных систем отвода тепла от расплавленной активной зоны и применения вентиляционно-фильтрующих систем.

Необходимым условием эффективности таких средств должна быть качественная диагностика состояния активной зоны, отсутствие в развитии аварий пороговых эффектов и разработка для оперативного персонала соответствующих руководств по действию в аварийных ситуациях. Реализация подобной стратегии ввиду естественного желания свести маловероятные последствия к ничтожному воздействию на персонал и окружающую среду связана с неограниченным ростом затрат и поэтому также требует вероятностных оценок, несмотря на четкое понимание их неопределенностей, обусловленных недостаточностью понимания:

процессов разрушения активной зоны и физических процессов в защитной оболочке;

последовательностей развития аварий и влияния на эти процессы человеческого фактора;

корректности моделирования отказов по общей причине (землетрясение, наводнения, пожары) и катастрофических ситуаций внешнего происхождения как событий с очень низкой частотой.

Необходимо также учитывать возможную неоднозначность эффектов от тех или иных мер управления аварией. Так, добавление воды в разрушенную активную зону может привести к эффекту парового взрыва и увеличению образования водорода;

разгерметизация первого контура может способствовать сохранению целостности корпуса реактора, но в некоторой степени будет уменьшать запасы воды;

вентиляция защитной оболочки может способствовать сохранению ее целостности, но увеличивать выбросы;

душирование защитной оболочки уменьшает ее внутреннее давление, но потенциально может возрасти взрывоопасная концентрация водорода и т. д.

Особенно возрастают с повышением уровня анализа феноменологические неопределенности и связанные с ними неопределенности результатов вероятностного анализа безопасности.

Большая роль в предотвращении и смягчении последствий тяжелых аварий отводится оператору, так как он должен выполнять свои обязанности в экстремальных стрессовых условиях.

С учетом отмеченных неопределенностей развития ситуаций и естественной неполноты знаний о них существующую помощь оператору могут оказать симтомно-ориентированные процедуры. Еще одним возможным путем усовершенствования управления вероятными авариями может быть введение в состав эксплуатационной смены специально обученного инженера по безопасности (как это сделано на французских АЭС), готового оказывать оператору в любое время квалифицированную помощь по применению аварийных процедур.

Оценка человеческого риска в управлении тяжелыми авариями предполагает четкое понимание истинной эксплуатации установок, включая знания о предпочтительных стратегиях операторов, реальном использовании процедур, трудностях взаимодействия операторной смены с эксплуатационными системами, слабых местах в проекте пультной, и идентификацию всех внешних, личных, групповых (коллективных) и организационных факторов, которые могут влиять на поведение человека и т. п.

Ограничения в оценке человеческого риска обычно обусловлены: неполнотой адекватности анализов поведения оператора в конкретных ситуациях путем моделирования намерений, недостаточностью реальных «поведенческих» данных, слабым учетом организационных аспектов управления и коммуникационных связей различных групп лиц, вовлеченных в управление аварией. Основными средствами для получения данных в упомянутых областях могли бы быть наблюдения за поведением оператора при моделировании аварийных ситуаций на симуляторе и работе в реальных условиях, а также сравнительные исследования однотипных ситуаций по имеющимся разнотипным методикам.

В целом моделирование управления авариями может быть полезным для усовершенствования знаний по текущим руководствам, взаимодействию человек — машина и принятию решений.

По материалам совещания МАГАТЭ предполагается выпустить итоговый отчет.

НИКИТИН Ю. М.

## VI Всесоюзный семинар по проблемам физики реакторов

Семинар, проходивший в сентябре 1989 г. в МИФИ, был посвящен нейтронно-физическим проблемам безопасности ЯЭУ. В нем участвовали 135 специалистов, представлявших научные и конструкторские организации, АЭС, Госатомэнергонадзор СССР, высшие учебные заведения, готовящие специалистов для ядерной энергетики,

было представлено 104 доклада, из них пять обзорных, по следующим основным направлениям:

- критерии безопасности ЯЭУ;
- новые концепции безопасных реакторов, устойчивых к тяжелым авариям;
- повышение безопасности действующих реакторов, в особенности РБМК;