

СЕКЦИЯ № 5 «ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ. АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ»

*Г.А. Ершов, д.т.н., профессор (АО ИК «АСЭ»),
В.Б. Морозов, к.т.н. (АО «Атомэнергопроект»),
Г.И. Самохин, к.т.н. (ФБУ «НТЦ ЯРБ»),
Е.А. Шиверский, к.т.н. (АО «НИКИЭТ»)*

ВАБ АС выполняется в несколько этапов и, соответственно, различаются ВАБ нескольких уровней:

- ВАБ-1 - разработка вероятностной модели энергоблока АЭС для определения финальных состояний с повреждением источников радиоактивности и оценки значений вероятностей их реализации;
- ВАБ-2 - разработка вероятностной модели энергоблока АЭС для определения распределения аварийных выбросов и последствий аварий;
- ВАБ-3 - анализ распространения выбрасываемых за пределы герметичной оболочки РВ, оценка создаваемых при этом доз облучения, расчет комплексных показателей безопасности, включая оценку риска от АЭС.

Важной составной частью ВАБ всех уровней является качественный и количественный анализы надежности систем и оборудования ЯЭУ, важных для безопасности.

На каждом этапе ВАБ имеет место комплексное использование вероятностного и детерминированного подходов. Например, при выполнении ВАБ-1 для работы энергоблока на мощности и внутренних исходных событий (ИС) (отказы оборудования, ошибки персонала и т.п.) вероятности реализации конечных состояний (КС) с нарушением условий и пределов безопасной эксплуатации рассчитываются на основании вероятностных методов. Уровни же ущерба при переходе энергоблока в каждое из КС определяются детерминированными методами. С помощью детерминированных методов (нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов) определяются критерии успеха систем безопасности, параметры аварий и т.д. Детерминированные методы используются и при отборе самих ИС, подлежащих глубокому детальному анализу.

Характерной чертой ВАБ является то, что количество расчетных детерминистических обоснований значительно (на порядки) превышает (по крайней мере, должно превышать) количество аналогичных расчетов, выполняемых, например, при разработке 15-го и 16-го разделов Отчета по обоснованию безопасности. В пределе, детерминистические расчеты должны выполняться для каждой аварийной последовательности (АП), каждого КС.

Можно утверждать, что качество ВАБ во многом определяется качеством поддерживающих детерминистических расчетов. И отсюда же следует, что качество ПС, аттестуемых в других секциях Совета по аттестации ПС, непосредственно влияет на качество ВАБ.

В то же время методы ВАБ имеют собственные особенности и собственные подходы к обеспечению качества анализа и качества используемых ПС. Современные ПС для ВАБ позволяют автоматизировать практически все этапы разработки логико-вероятностной модели безопасности АЭС. Не автоматизированными являются только этапы разработки вербальной (словесной) и графической моделей. При этом разработка графической модели позволяет в дальнейшем получать расчетный вероятностный многочлен без участия человека.

В настоящее время известно большое количество ПС зарубежной и отечественной разработки, используемых для моделирования и расчета показателей надежности и безопасности АЭС и их систем – «CAFTA», «SAPFIRE», «PRA_Workstation», «SETS», «RISK-MAN», «MLD-Code», «MPLD-Software», «PRAISE», «Risk Puck», «Risk Spectrum», «Criss, Relex RBD», «ROCS», «АРБИТР», «БАРС», «AvroRel» и др.

Многие ПС имеют длительную историю развития и использования. Это относится и к ПС отечественной разработки. Так, например, первая версия ПС «Criss» была разработана в 1992 г., версия 2.0 – в 2000 г. В 2001 г. выпущено ПС «Criss 3.0», в 2002 г. – «Criss 3.1», в 2003 г. – «Criss 4.0», в 2009 г. – «Criss 5.1», в 2015 г. – «Criss 5.3».

Первая версия ПС «АСМ» (ныне «АРБИТР») была разработана в 1983-1985 гг. В 1989-1990 гг. разработано ПС «АСМ» версии "ИСЛАМ". ПС «АСМ 5.0» разработано в 1990 г. В 2000 г. разработаны ПС «АСМ 2000» и ПС «АСМ-НИЦ БТС». В 2001 г. - ПС «АСМ 2001», в 2002–2005 гг. ПС «АСМ СЗМА».

Разработка ПС «БАРС» велась в 2004-2010 гг., предшественниками ПС «БАРС», являлись перечисленные выше версии ПС «АСМ», а также ПС «NEWАСМ» (версия 2.01 была разработана в 1994 г., версия 3 - в 1996 г.).

Необходимо отметить, что подавляющее большинство ПС, отмеченных выше, имеют в своей основе один и тот же математический аппарата, исключая аппарат графического моделирования.

В России для расчетов в рамках ВАБ АЭС используются, в основном, ПС «Risk Spectrum» и ПС «Criss». Для оценки надежности систем объектов использования атомной энергии используются ПС «БАРС» и «АРБИТР».

Секция №5 была образована вместе с другими секциями Совета по аттестации ПС после вступления в силу временного положения об аттестации программных средств, используемых при обосновании безопасности объектов атомной энергетики, утвержденного Постановлением Госпроматомнадзора СССР от 28.05.1991 №5. В это время по заказу Калининской АЭС разрабатывалось ПС «NEWАСМ 2.01» и Заказчик потребовал аттестовать разрабатываемое ПС.

В то время еще не существовало требований к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии. Как известно, они были введены в действие значительно позже приказом Госатомнадзора РФ №122 от 28.12.2000. Поэтому состав отчета и содержание его разделов разрабатывались представителем Заявителя Ершовым Г.А. и первым руководителем секции №5 Шубейко Е.К. путем «мозгового штурма».

В 1997 г. верификационный отчет был разработан, но Заказчик не нашел средств на аттестацию, через некоторое время наступил дефолт и ПС «NEWАСМ» так и не было аттестовано. В 2003 г. были аттестованы сразу две версии ПС «Risk Spectrum»: «Risk Spectrum 2.1» (паспорт №159 от 28.03.2003) и «Risk Spectrum 1.10» (паспорт №159 от 28.03.2003). Верификационные отчеты этих ПС разрабатывались специалистами АО «Атомэнергопроект».

Вторым аттестованным ПС стала программа «RISK PUCK версия 1.30», разработанная ОЦПК Минатома России (паспорт №172 от 16.03.2004). В 2006 г. было аттестовано ПС «Criss 4.0» (паспорт №212 от 01.03.2006). Данное ПС разработано

АО «ОКБМ Африкантов. Необходимо отметить, что данная организация очень серьезно относится к вопросу аттестации ПС и регулярно представляет для аттестации новые версии ПС – «Criss 5.1» (паспорт №291 от 14.04.2011), «Criss 5.3» (паспорт №392 от 14.07.2016), «Criss 6.0» (в процессе аттестации).

В 2007 г. было аттестовано ПС «АРБИТР» (паспорт №222 от 21.02.2007). В 2010 г. аттестовано ПС «ROCS 2.0» (паспорт №270 от 18.02. 2010). В 2012 г. аттестовано ПС «БАРС 1.0» (паспорт №303 от 02.04.2012). В 2015 г. аттестовано ПС «AvroRel» (паспорт №375 от 24.06.2015).

Процесс аттестации ПС для ВАБ и анализа надежности в значительной степени отличается от процессов аттестации ПС в других секциях Совета. Одной из причин является практическая невозможность проверки результатов моделирования и расчета путем эксперимента.

Поэтому первые аттестованные ПС проверялись путем сравнения выдаваемых ими результатов с результатами аналитических расчетов. Однако с накоплением опыта аттестации и увеличением количества аттестованных ПС появилась возможность проведения кросс-верификации.

Уже при аттестации ПС «АРБИТР» был разработан набор тестовых расчетных примеров, которые решались с помощью нескольких ПС – ПС «АРБИТР», ПС «Risk Spectrum 1.10» и ПС «Relex RBD».

При аттестации ПС «БАРС» набор тестовых примеров был расширен, а кросс-верификация проводилась с помощью уже шести ПС – самого ПС «БАРС», ПС «АСМ СЗМА», ПС «Risk Spectrum 1.10» и ПС «Relex RBD», ПС «Criss 5.1», ПС «SAPHIRE», ПС «ROCS 2.0».

К настоящему времени разработано 15 групп тестовых примеров, включающих более 60 тестовых задач, полностью покрывающих область применения описанных ПС. Не все ПС могут решать все тестовые задачи, что не является их недостатком, но позволяет более четко очертить область использования ПС.

Особенностью аттестации ПС для ВАБ и анализа надежности является то, что при одинаковых графических моделях (вне зависимости от примененного графического аппарата) и одинаковых вероятностных параметрах элементов модели (частот исходных событий и показателях надежности оборудования) результаты расчетов, выполненных различными ПС, совпадают. Если же имеется несовпадение, то это либо свидетельствует о наличии ошибок, либо, что бывает гораздо чаще, о наличии каких-то ограничений и допущений, использованных при разработке одних ПС и не использованных при разработке других ПС. В последнем случае эксперты требуют достаточно детального описания этих ограничений и допущений.

Помимо предоставления самих результатов расчета эксперты требуют и представления использованных моделей, в том числе – логических (наборов генерируемых ПС минимальных сечений и кратчайших путей). Практика аттестации показывает, что, как правило, эти наборы путей и сечений совпадают.

Анализ чувствительности и неопределенности является одной из основных задач ВАБ. Руководства по безопасности по ВАБ требуют выполнять оценку:

- неопределенности расчетов вероятностных показателей безопасности, обусловленной вероятностной природой моделируемых явлений и неполнотой знаний о развитии физических процессов;
- значимости факторов, наиболее сильно влияющих на результаты расчетов вероятностных показателей безопасности;
- чувствительности результатов расчетов вероятностных показателей безопасности к исходным данным, использованным при их выполнении, выявление факторов, наиболее сильно влияющих на результаты расчетов вероятностных показателей безопасности.

Практика выполнения ВАБ показывает, что наиболее сильно на его результаты влияет качество исходных данных по частотам ИС и параметрам надежности оборудования, а также качество разработки логико-вероятностных моделей.

Качество исходных данных определяется качеством информации об опыте эксплуатации АЭС, качеством статистических данных. К сожалению, на этот фактор повлиять весьма трудно, как по объективным, так и по субъективным причинам. К объективным причинам следует отнести малость размеров статистических выборок, обусловленных малой серийностью и высокой надежностью оборудования АЭС. К субъективным причинам следует отнести человеческий фактор.

Качество построения логико-вероятностной модели, изначально - графической модели, как совокупности деревьев событий и деревьев отказов (или СФЦ) определяется не только квалификацией разработчиков модели, но и качеством проведения теплогидравлических и нейтронно-физических расчетов, выполняемых в поддержку ВАБ. Качество же поддерживающих расчетов во многом определяется качеством соответствующих ПС.

Важными задачами интерпретации и практического использования полученных результатов ВАБ являются анализы значимости, чувствительности и неопределенности.

Анализ неопределенности является мерой качества используемых исходных данных по надежности элементов, частотам ИС и другим исходным данным, то есть связывает неопределенность результатов ВАБ с неопределенностью исходной информации. Как правило, анализ неопределенности реализуется в ПС ВАБ с помощью метода Монте-Карло. Такой анализ может выявить, какие данные вносят наибольшую неопределенность в результаты ВАБ и, следовательно, разработать предложения для ее снижения, добиться повышения качества оценок.

Оценка чувствительности проводится, например, с использованием фактора чувствительности. При использовании ПС Risk Spectrum фактором чувствительности является любое число в диапазоне от 1 до 10. При этом вначале вычисляется вероятность свершения верхнего события при задании вероятностей базисных событий, деленных на величину фактора, затем вычисляется вероятность свершения верхнего события, при задании вероятностей базисных событий, умноженных на величину фактора. Оценка чувствительности проводится путем деления результатов первого расчета на результаты второго расчета.

Заключение

Выполнение ВАБ при обосновании безопасности ОИАЭ является обязательным требованием российских и международных документов. АЭС представляют собой сложнейшие организационно-технические системы, поэтому выполнение ВАБ этих объектов в соответствии с современными требованиями невозможно без использования ПС.

ПС для ВАБ имеют ярко выраженную специфику, отличающую их от других ПС, используемых при обосновании безопасности ОИАЭ. Математический аппарат, лежащий в основе ПС для ВАБ, хорошо развит. Накоплена достаточно представительная база данных по частотам ИС и параметрам надежности оборудования ОИАЭ. Это позволяет решать задачи ВАБ с необходимым качеством. Имеется база тестовых примеров, позволяющая не только оценить качество ПС, но и четко определить область их применения. Кроме того, наличие этих тестовых примеров является ориентиром для разработчиков ПС, указанием на пути совершенствования и развития ПС. За годы работы секции № 5 Совета было аттестовано семь ПС (а если учитывать версии этих ПС, то – 10).

