

## ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС «БЕЛЕНЕ» НА ЭТАПЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА

**В.Б. Морозов, Г.В. Токмачев, Е.В. Байкова**  
ОАО «Атомэнергопроект», Москва, Россия

### **Введение**

АЭС «Белене» в Болгарии - это практическая реализация концептуального проекта АЭС-92, прошедшего проверку на соответствие требованиям EUR и получившего сертификат соответствия. Практически полным аналогом проекта АЭС «Белене» является АЭС «Куданкулам», чье строительство в Индии в настоящее время закончено и ведутся пусконаладочные работы.

Заложенные в проект АЭС «Белене» основы безопасности базируются на применении в максимально возможной степени инженерных принципов концепции глубокоэшелонированной защиты, изложенных в действующих нормативных документах, и на использовании результатов анализа безопасности действующих АЭС.

Одним из основных принципов является применение функционального и/или конструктивного разнообразия в системах, выполняющих каждую отдельную функцию безопасности. В проекте применяются взаимно резервирующие друг друга системы активного и пассивного принципов действия. Применение разнообразия обеспечивает глубокую защиту от отказов по общей причине и позволяет на несколько порядков снизить вероятность невыполнения функций безопасности.

При разработке проектных решений для АЭС «Белене» был учтен опыт проектирования и эксплуатации серийных блоков АЭС с ВВЭР-1000/В-320. В настоящее время в России, Украине, Чехии и Болгарии эксплуатируются 22 энергоблока с реакторами В-320. Эксплуатация АЭС с реакторами В-320 продемонстрировала, что на протяжении суммарной наработки этих энергоблоков около 500 реакторо-лет не произошло ни одного сколько-нибудь серьезного инцидента с нарушением безопасности.

В развитие традиционных подходов, апробированных на действующих АЭС с ВВЭР-1000, в проекте АЭС «Белене» реализованы следующие решения:

- для приведения реактора в подкритическое состояние и поддержания его в этом состоянии в широком диапазоне рабочих параметров использованы модернизированная система аварийной защиты реактора с увеличенным вдвое по сравнению с ВВЭР-1000/В-320 числом рабочих органов, система быстрого ввода бора и пассивная система быстрого ввода бора;

- предусмотрены взаимно резервирующие системы аварийного расхолаживания и пассивного отвода тепла по второму контуру - при этом обе системы способны отводить тепло неограниченно долго, в то время как на АЭС с ВВЭР-1000/В-320 система аварийного расхолаживания может работать ограниченное время, определяемое запасом воды в баках этой системы;

- дополнительно к активным системам аварийного охлаждения активной зоны и гидроемкостям первой ступени в проекте применены гидроемкости второй ступени. Две ступени гидроемкостей и система пассивного отвода тепла резервируют активные системы по функции поддержания запаса теплоносителя в активной зоне в течение длительного периода времени, что обеспечивает возможность восстановления критических функций безопасности;

- в системах, выполняющих функции изоляции парогенераторов или защитной оболочки от окружающей среды, применена различная по конструкции изолирующая арматура (быстродействующие отсечные клапаны, изолирующие задвижки с электрическим или пневматическим приводами);

– разработана двойная железобетонная герметичная оболочка с пассивной системой удаления водорода, системой вентиляции и очистки среды из объема кольцевого зазора, системой удержания расплава активной зоны (ловушкой), которая обеспечивает выполнение критериев ограниченного радиационного воздействия для широкого спектра запроектных аварий, включая тяжелые аварии с полным расплавлением ядерного топлива.

Принятая в проекте концепция также предусматривает применение в активных системах безопасности дополнительных мер по снижению влияния отказов по общей причине и ошибочных действий персонала. В качестве одной из таких мер рассматривается использование отдельных каналов систем безопасности для целей нормальной эксплуатации. Ряд каналов этих систем при работе блока на мощности непрерывно работает, а другие каналы находятся в режиме ожидания. При этом большая часть оборудования (насосов, трубопроводной арматуры и т.п.) работающих каналов находится в таких же состояниях, которые требуются для выполнения заданных функций безопасности при возникновении аварийных ситуаций. Такое решение позволяет повысить уровень готовности систем безопасности за счет исключения скрытых отказов работающего оборудования и отказов его элементов управления, а также обеспечить дополнительную защиту от отказов по общей причине, применяя разнообразие режимов использования оборудования.

Высокий уровень безопасности АЭС «Белене» обеспечивается за счет задания требований к значениям вероятностных показателей безопасности, соответствие которым доказывается результатами количественной оценки уровня безопасности АЭС методами вероятностного анализа безопасности (ВАБ).

#### **Требования к вероятностным показателям безопасности АЭС «Белене»**

Требования к значениям вероятностных показателей безопасности для проекта АЭС «Белене» установлены для двухблочной станции в целом, а именно:

- среднее значение суммарной частоты повреждения активной зоны должно быть менее  $1 \cdot E-05$  на АЭС в год;
- среднее значение суммарной частоты превышения критериев ограниченного воздействия должно быть не менее  $1 \cdot E-06$  на АЭС в год, т.е. частота больших радиоактивных выбросов в окружающую среду, при которых необходимо принимать срочные защитные меры для населения, не должна превышать  $1 \cdot E-06$  событий на АЭС в год;
- кроме того, среднее значение суммарной частоты для больших ранних выбросов радиоактивности должно быть существенно меньше частоты превышения критериев ограниченного воздействия.

#### **Организация работ по ВАБ**

ВАБ встроен в процесс проектирования АЭС «Белене» и имеет итеративный характер. Требования к объему и качеству ВАБ соответствуют требованиям EUR [1]. На этапе технического проекта разработано три ревизии документации и моделей ВАБ. На этой стадии любой анализ является предварительным, а его объем и глубина зависят от готовности и полноты исходной и обосновывающей информации по проекту АЭС, в частности, расчетных обоснований безопасности при запроектных/тяжелых авариях и оценки их радиационных последствий. По мере детализации проекта в дальнейшем будут разработаны более детальные вероятностные анализы.

ВАБ на этапе технического проекта выполнялся ОАО «Атомэнергопроект» (Москва) при активном участии ОКБ «Гидропресс». В дальнейшем планируется подключение к работе других участников, включая компанию AREVA.

Для организации работ подготовлена целевая программа обеспечения качества ВАБ и набор руководств по выполнению отдельных задач. Программа обеспечения качества определяет принципы, организационную структуру, взаимодействие, технические требования и порядок деятельности, направленные на обеспечение качества при выполнении ВАБ как составной части проекта АЭС «Белене».

Работы по ВАБ проходят несколько уровней внутренних проверок: входной контроль, контроль при проектировании, выходной контроль и нормоконтроль. Кроме того, техническая адекватность материалов по ВАБ проверяется многоэтапными внешними проверками, включая приемку болгарского Заказчика, аудиты независимых компаний и техническую экспертизу МАГАТЭ. В частности, качество выполнения ВАБ проверялось двумя миссиями IPSART МАГАТЭ с участием наблюдателей из Risk Audit, в ходе которых детально, в интерактивном режиме ведущие эксперты из различных стран исследовали 143 проблемы, относящиеся к важным аспектам всех выполненных анализов в соответствии с установленной процедурой МАГАТЭ [2].

Результаты экспертизы МАГАТЭ являются основой при принятии решения регулирующим органом Болгарии о выдаче лицензии на сооружение АЭС «Белене».

#### **Цели, объем и методология ВАБ**

ВАБ АЭС «Белене» разрабатывается для достижения следующих основных целей:

- проверки соответствия проекта заданным критериям безопасности;
- подтверждения эффективности принятых проектных решений в части обеспечения безопасности;
- разработки интегральной вероятностной модели как основы дальнейших приложений ВАБ на стадии эксплуатации.

Комплексная оценка достигнутого в проекте АЭС «Белене» уровня безопасности проводилась на основе анализа результатов ВАБ. В составе технического проекта были разработаны ВАБ уровня 1 (ВАБ-1) и ВАБ уровня 2 (ВАБ-2). ВАБ выполнены для внутренних иницирующих событий, вызванных отказами оборудования АЭС и ошибками персонала, а также для целого ряда воздействий. Среди них - внутренние воздействия на площадке АЭС (пожары, затопления, образование летящих предметов) и внешние воздействия как природного (сейсмические и климатические явления, наводнения), так и техногенного характера (взрывы, образования токсичных газов, аварии на транспорте). Анализы выполнялись для режимов с работающим и остановленным реактором, включая перегрузку ядерного топлива.

Методология выполнения ВАБ для АЭС «Белене» разработана в соответствии с требованиями стандартов МАГАТЭ для ВАБ первого уровня [3] и для ВАБ второго уровня [4]. В качестве методологической основы для выполнения ВАБ использован метод деревьев событий и отказов, широко применяемый в мировой практике. Разработанная расчетная интегральная модель включает комплекс логически связанных между собой элементов, таких как деревья событий и отказов, а также базы данных по показателям надежности оборудования, параметрам моделей отказов общего вида, частотам иницирующих событий и вероятностям ошибочных действий персонала. Для разработки модели и проведения расчетов использовано программное средство Risk Spectrum PSA Professional, аттестованное в российском надзорном органе и представляющее из себя интегрированный пакет разработки моделей и расчета вероятностных показателей безопасности ВАБ-1 и ВАБ-2.

При проведении ВАБ-1 выполнены следующие задачи:

- анализ эксплуатационных состояний АЭС;
- отбор и группирование иницирующих событий;
- моделирование аварийных последовательностей, включая анализ зависимостей на уровне функций безопасности;
- анализ надежности систем, включая выявление и анализ внутрисистемных и межсистемных зависимостей и отказов общего вида (отказов по общей причине);
- анализ данных по частотам иницирующих событий и показателям надежности элементов АЭС, включая оценку параметров отказов общего вида и неготовности оборудования из-за испытаний, технического обслуживания и ремонта;

- моделирование действий персонала, включая выявление и анализ зависимостей между действиями персонала;

- разработка интегральной логико-вероятностной модели энергоблока и выполнение количественных оценок, включая определение частоты повреждения активной зоны реактора, анализы чувствительности, значимости и неопределенностей;

- анализ результатов и оценка эффективности технических решений проекта.

При разработке ВАБ-2 выполнены следующие задачи:

- анализ интерфейса моделей ВАБ-1 и ВАБ-2, включая выбор перечня состояний с повреждением станции и оценку их частот;

- анализ надежности систем, локализации, включая выявление отказов общего вида, а также зависимостей от систем, рассматриваемых в ВАБ-1;

- определение основных категорий выбросов;

- анализ и моделирование аварийных последовательностей, характеризующих развитие аварии в герметичном объеме (дерево событий защитной оболочки), включая определение вероятностей феноменологических событий;

- моделирование действий персонала и анализы зависимостей;

- выполнение количественных оценок, включая определение частоты превышения предельного аварийного выброса, анализы чувствительности, значимости и неопределенностей;

- анализ результатов и оценка эффективности технических решений проекта.

Основные задачи ВАБ для внутренних и внешних воздействий (опасностей) варьируются с учетом специфики воздействия, но в общем виде рассматривают следующие аспекты:

- оценку параметров воздействия в терминах его поражающих факторов и площади поражения;

- оценку частоты воздействия или спектра частот для его различных параметров;

- определение номенклатуры отказываемого оборудования и оценку вероятности его отказа;

- категоризацию выявленных зависимых отказов в терминах инициирующих событий и отказов оборудования, выполняющего функции безопасности;

- определение и анализ других аспектов, влияющих на выполнение функций безопасности, например, пересмотр анализа надежности персонала с учетом стресса и других факторов, влияющих на поведение;

- переработку вероятностной модели ВАБ для внутренних событий с целью учета вызванных воздействием зависимых отказов.

### **Проблемы, решенные в процессе разработки ВАБ**

Естественной проблемой, которую приходится решать разработчикам ВАБ на ранних стадиях проектирования, является недостаток или отсутствие детальной информации по ряду важных аспектов. Это связано с незавершенностью проектных работ. В частности, на данной стадии разработки проекта информация по техническому обслуживанию и действиям персонала достаточно неопределенная, объем анализов аварийных процессов является ограниченным, отсутствуют детальные данные по управляющим системам безопасности, компоновке оборудования, кабельной раскладке и т.п. При нехватке какой-либо информации преимущественно использовались консервативные предположения.

В проекте АЭС «Белене» реализованы разнообразные меры защиты от отказов по общей причине (общего вида). Для оценки их эффективности разработана и использована методология моделирования отказов общего вида многоканальных систем с различной степенью общности влияющих факторов [5].

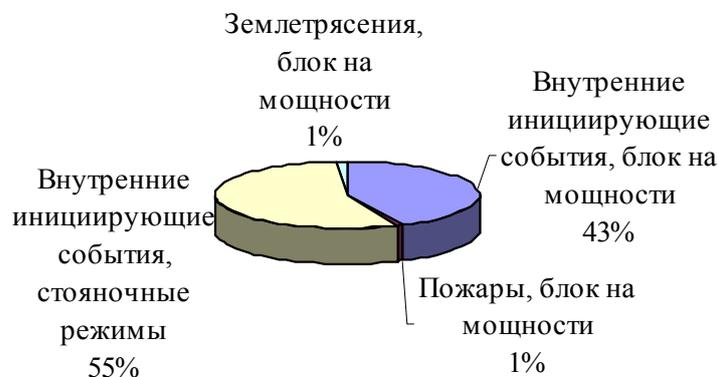
Для новых проектов АЭС с ВВЭР большое значение имеет выбор расчетного интервала моделирования работы систем при аварии. Как правило, в ВАБ, выполненных для действующих АЭС, этот интервал ограничен 24 ч после возникновения инициирующего события. В новых проектах применены пассивные системы отвода тепла и долговременного залива активной зоны (гидроемкости второй ступени), что позволило существенно снизить вероятность тяжелого повреждения активной зоны на данном интервале времени. Тем не менее, время эффективной работы пассивных систем залива активной зоны ограничено запасом воды в гидроемкостях второй ступени. Поэтому был разработан и применен специальный метод, позволяющий моделировать аварийные последовательности за пределами указанного временного интервала, для того чтобы показать, что увеличение расчетного интервала времени не приведет к существенному изменению значений вероятностных показателей безопасности, полученных для периода 24 ч.

Одной из особенностей работ по ВАБ при проектировании АЭС «Белене» является использование вероятностной модели не только для оценки уровня безопасности, но и последующее ее применение для решения широкого круга эксплуатационных проблем. Поэтому по требованию Болгарского заказчика для стадии рабочего проекта разрабатывается единая симметричная интегральная модель - модель ВАБ уровней 1 и 2 для всего спектра эксплуатационных состояний энергоблока и анализируемых исходных событий и воздействий. В отличие от стандартного базового ВАБ, разработка такой модели приводит к значительному увеличению размеров модели и, соответственно, трудозатрат.

#### Основные результаты ВАБ

Для проверки соответствия проекта АЭС установленным критериям безопасности были получены оценки частот повреждения активной зоны и превышения установленных пределов радиационного воздействия (критерии CLI). Оценка частоты повреждения активной зоны выполнена с учетом всех основных состояний блока (работа на мощности, останов на перегрузку или внеплановый ремонт) и инициирующих событий, включая внутренние пожары и наиболее характерные для условий площадки АЭС внешние воздействия.

Суммарная частота повреждения активной зоны от оцененных внутренних инициирующих событий, внутренних и внешних воздействий составляет  $5,1E-07$  1/год, или  $1,02 E-06$  1/год в пересчете на двухблочную АЭС в год. Процентное соотношение основных вкладчиков в суммарное значение частота повреждения активной зоны представлено на рисунке.



Распределение вкладов в частоту повреждения активной зоны

Общая частота последовательностей, при которых может быть превышен как минимум один из числа установленных критериев ограниченного воздействия для одного блока АЭС, оценивается величиной  $4,59E-07$  1/год. При этом частота большого раннего выброса, требующего принятия экстренных контрмер, составляет  $2,17E-07$  1/год для одного блока. Для АЭС в целом указанные показатели отвечают значениям  $9,18E-07$  1/год (против целевого критерия  $1,0 E-06$  1/год) и  $4,34E-07$  1/год, соответственно.

Суммарная частота аварийных последовательностей, для которых ожидается превышение пределов ограниченного воздействия, при учете только внутренних иницирующих событий при работе блока на мощности составляет  $4,23E-07$  на реактор-год или  $8,46E-07$  1/год для двухблочной АЭС.

Следует отметить, что на настоящей стадии разработки проекта оценка вероятностных критериев безопасности - частот повреждения активной зоны и превышения пределов ограниченного воздействия - выполнена на основе ряда допущений, в значительной мере действующих в консервативную сторону. В частности, оценка вклада в частоту повреждения активной зоны от площадочных и внешних воздействий получена на основе результатов огибающего скринингового анализа. При рассмотрении радиационных аспектов аварий, вызванных указанными воздействиями, как правило, постулировалось наиболее тяжелое последствие, характеризующееся большим ранним выбросом радиоактивности.

Рассматривая полученные результаты в целом нужно подчеркнуть, что вероятностный критерий безопасности по частоте повреждения активной зоны для двухблочной АЭС обеспечен со значительным запасом даже с учетом консервативности принятого подхода.

Для определения степени влияния пассивных систем безопасности на изменение общей частоты повреждения активной зоны был выполнен анализ чувствительности. Получено, что отказ от систем пассивного отвода тепла и гидроемкостей второй ступени приводит к значительному увеличению частоты повреждения активной зоны до  $5E-06$  в год, если рассматривать только внутренние иницирующие события и состояния работы блока на номинальной мощности. Таким образом, применение в проекте указанных выше пассивных систем является необходимым, т.к. без них при учете всех возможных иницирующих событий и эксплуатационных состояний проблематично выполнить требования регулирующего органа Болгарии, которые, в отличие от требований EUR, распространяются не на отдельный блок, а относятся к двухблочной АЭС в целом.

#### **Сравнение результатов ВАБ, выполненного для проекта АЭС «Белене», с результатами ВАБ для АЭС с ВВЭР второго поколения**

Как показано выше, в проекте АЭС «Белене», который относится к «поколению 3+» АЭС с легководящими реакторами под давлением, реализованы решения, направленные на существенное повышение безопасности по сравнению с действующими АЭС второго поколения, к которым относятся серийные блоки АЭС с ВВЭР-1000/В-320. В этой связи представляет интерес сравнение полученных вероятностных показателей безопасности с аналогичными характеристиками типовых серийных блоков АЭС с ВВЭР-1000/В-320.

В таблице представлены результаты ВАБ, полученные для АЭС «Белене» и действующих блоков АЭС с ВВЭР-1000/В-320 второго поколения на основе использования доступных источников. Для сравнения были выбраны значения частот повреждения активной зоны для состояний работы на мощности и с остановленным реактором, а также оценки частот большого раннего выброса, полученные для энергоблоков Балаковской АЭС и АЭС «Темелин» [6]. Для сопоставимости результатов они представлены в расчете на один энергоблок.

**Сравнительный анализ результатов ВАБ для энергоблока АЭС «Белене» и действующего энергоблока с реактором ВВЭР-1000/320**

Частота повреждения активной зоны, 1/год		Частота большого раннего выброса, 1/год	
АЭС с ВВЭР-1000/В-320	Блок АЭС «Белене»	АЭС с ВВЭР-1000/В-320	Блок АЭС «Белене»
4,5 E-05 <sup>1</sup> 1,5 E-05 <sup>2</sup>	5,0E-07 <sup>3</sup>	4,0 E-06 <sup>4</sup>	2,2 E-07

Из сравнения результатов ВАБ для АЭС «Белене» и действующих АЭС с ВВЭР второго поколения видно, что уровень безопасности АЭС «Белене» более чем на порядок выше в терминах частоты повреждения активной зоны реактора и частоты большого раннего выброса. Основной эффект в снижении значений указанных частот достигается за счет применения пассивных систем безопасности. В действительности эффект еще выше, чем это следует из таблицы, поскольку для АЭС с ВВЭР-1000/В-320 рассмотрены не все эксплуатационные состояния и иницирующие события, а для АЭС «Белене», напротив, выполнен полномасштабный анализ, причем вклад от многих иницирующих событий (прежде всего, вызванных внешними опасностями) получен на консервативной основе.

Следует также упомянуть, что полученные для проекта АЭС «Белене» оценки находятся в диапазоне значений, характерном для эволюционных проектов поколения 3 [7].

**Заключение**

Результаты ВАБ показывают, что проект АЭС «Белене» соответствует заданным критериям безопасности, что подтверждает эффективность принятых проектных решений в части обеспечения безопасности.

Следует отметить, что ВАБ в настоящее время все более выполняет роль основного документа, по результатам которого международными экспертами делаются выводы об уровне безопасности АЭС, впоследствии передаваемые публичной огласке, и на основании которых регулирующими органами принимаются решения о начале строительства АЭС или вводе ее в эксплуатацию. Поэтому в условиях отсутствия детальной информации по ряду систем и элементов на стадии технического проекта количественные результаты ВАБ получены в заведомо консервативных предположениях, чтобы принципиально исключить возможность недооценки вероятностных показателей безопасности. В последующем планируется получение более реалистичных оценок, в частности, по частоте разрыва корпуса реактора, а также в отношении анализа последствий ряда аварий, которые на стадии технического проекта приравнены к максимально тяжелым последствиям с большим ранним выбросом радиоактивности в окружающую среду.

На стадии рабочего проектирования ВАБ будет детализироваться по мере разработки проекта, а допущения моделирования будут обосновываться по результатам уточненных детерминистических анализов безопасности.

Для верификации анализов внешних воздействий планируется проведение обходов станции на последних этапах строительно-монтажных работ.

<sup>1</sup> Блок 4 Балаковской АЭС, внутренние иницирующие события, работа блока на мощности и состояния с остановленным реактором.

<sup>2</sup> АЭС «Темелин» в Чехии, внутренние иницирующие события, работа блока на мощности.

<sup>3</sup> Внутренние, площадочные, внешние иницирующие события, работа блока на мощности, состояния с остановленным реактором.

<sup>4</sup> АЭС «Темелин», внутренние иницирующие события, работа блока на мощности.

Заключительной стадией работ по ВАБ станет подготовка вероятностной модели для использования на этапе эксплуатации АЭС.

### Список литературы

- 1. «European Utility Requirements for LWR Nuclear power Plants. Volume 2 Revision C». – France: EDF/SEPTEN, April 2001.
- 2. IAEA-TECDOC-832, «IPERS Guidelines for the International Peer Review Service, Second Edition». - Vienna: IAEA, 1995.
- 3. «Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants». IAEA Safety Standards Series. SSG-3 - Vienna: IAEA, 2010.
- 4. «Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants». IAEA Safety Standards Series. SSG-4 - Vienna: IAEA, 2010.
- 5. В.Б. Морозов, Г.В. Токмачев «Подход к моделированию отказов по общей причине в ВАБ проектов новых АЭС с ВВЭР-1000». - Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. 2008, №4, с.31-41.
- 6. L. Kučera «Temelin PSA Level 2». IAEA Regional Workshop on Harmonization of Level 2 PSAs for VVER Reactors. - Sofia, Bulgaria, 20-24 October 2003.
- 7. J. Misak “Safety Assessment Issues Associated with Implementation of New Generation of Reactors”. EUROSAFE Forum 2010 – Cologne, Germany, 8-9 November, 2010.

## **ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС «БЕЛЕНЕ» НА ЭТАПЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА**

**В.Б. Морозов, Г.В. Токмачев, Е.В. Байкова**  
**ОАО «Атомэнергoproект», Москва, Россия**

Рассмотрен вероятностный анализ безопасности (ВАБ), выполненный для АЭС «Белене» на этапе разработки технического проекта. Обсуждается организация работ по ВАБ и выполненные экспертизы. Описаны цели и объем выполненных анализов. Рассмотрены проблемы, решенные в процессе разработки ВАБ. Описаны полученные результаты ВАБ. Охарактеризованы дальнейшие направления работ.

## **PROBABILISTIC SAFETY ASSESSMENT FOR BELENE NPP AT BASIC DESIGN STAGE**

**V. B. Morozov, G. V. Tokmachev, E. V. Baikova**  
**JSC “Atomenergoproekt”, Moscow, Russia**

The paper addresses the probabilistic safety assessment (PSA) performed for the Belene NPP at the basic design stage. The paper discusses organization of the PSA project and reviews carried out. The paper describes the goals and scope of the study. The issues resolved within the PSA development process are considered. The PSA results obtained are described. The future developments are outlined.