

Ю. В. Верюжский

МЕТОДЫ АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»

Анализ методов исследования безопасности объекта «Укрытие» (ОУ) показывает, что существующая нормативно-техническая база не позволяет получить достоверных количественных характеристик состояния ОУ при реализации регламентированных исходных событий. В результате ошибочных предпосылок занижен уровень консервативной оценки риска, определенный в официальных документах. Предлагается использовать системный подход для исследований и оценки негативных последствий процессов разрушения защитных барьеров ОУ. Решение строится на основе синтеза вероятностных и детерминистических методов при использовании натуральных обследований и экспертных оценок для верификации исходных и итоговых данных. Предложенное направление реализовано на всех этапах методики оценки риска. Приведены характерные примеры анализа последствий исходных событий падения летательного аппарата и взрывов вне ОУ.

Проблема предупреждения тяжелых аварий или оперативной ликвидации последствий возможных катастрофических воздействий на объект «Укрытие» (ОУ) требует выполнения в соответствии с принципами атомной энергетики анализа риска его существования [1, 2]. Такое направление является частью работ по достижению главной цели: необходимо получить социально и экономически оптимальное инженерное решение преобразования ОУ, обеспечивающее допустимый долговременный уровень его безопасности. Для исследования ОУ могут использоваться многочисленные разветвления совершенной методологической базы отрасли. Однако экстремальные особенности ОУ настолько усложняют задачу, что регламентированные методики оказываются **О Ю. В. Верюжский, 1998**

58

неприменимыми и требуется выполнение интенсивных разработок средств анализа, позволяющих достоверно оценивать риск на всех этапах работ на ОУ.

Вероятностные методы рассматриваются как наиболее перспективная основа таких исследований, поскольку они стали обобщающим межотраслевым направлением определения количественной оценки риска негативных последствий [3-5]. Такие величины представляются в виде произведения вероятности проявления аварийных процессов на уровень опасностей, оцениваемых по параметрам выбросов и загрязнений, мощностям экспозиционных доз и другим основным негативным показателям, которые затем приводятся к экономическому масштабу прямых и косвенных затрат на гипотетическое полное восстановление доаварийного состояния или на реальную ликвидацию последствий аварии.

Но возможности вероятностного аппарата ограничиваются по трем основным причинам. Во-первых, такая методология базируется на положениях классической теории надежности, предназначенной для исследований однотипных объектов. Все ее рекомендации по обеспечению эксплуатационных технологий и созданию необходимых ресурсов резервирования и восстановления строятся с помощью сбора данных об отказах, испытаниях, контроле работоспособности, статистических обобщениях и прогнозах на представительном множестве стандартных элементов. При таком подходе получают характеристики, усреднено отражающие качества совокупности объектов. Однако прогнозирование индивидуальной надежности экстремального объекта приводит к существенной погрешности результатов. Вторая причина, препятствующая реализации отраслевых методик, определяется тем, что они сформированы для анализа действующих блоков АЭС, где технологические операции принципиально отличаются от процессов на ОУ. Анализ истории формирования методологии оценки возможного риска промышленных реакторов [3, 4] и нормативной базы исследований ОУ [1,2] позволяет обнаружить третью причину: регламентированные методики ОУ существенно устарели и находятся на уровне отживших

идей максимально возможных событий, глубокоэшелонированной обороны и других неэффективных концепций [3, 4].

Детерминистические методы являются альтернативным направлением, потенциально пригодным для исследования риска ОУ. Этот подход приводит к однозначным оценкам многочисленных вариантов развития негативных механизмов. Стохастическая природа исходных данных учитывается при формировании нормативных критериев и проектных параметров, но вероятностные характеристики в вычислениях отсутствуют, и математические модели считаются адекватными исследуемым процессам. Однако попытки строгой реализации детерминистических методик также оканчиваются неудачей, поскольку невозможность преодоления неполноты и некорректности постановок граничных задач на существующем уровне базы данных ОУ исключает применение стандартных расчетных схем и средств реализации дискретных и функциональных аналитических аппаратов.

Гибридные методы часто становятся выходом из положения, когда отдельные компоненты системного анализа оказываются недостаточно универсальными. В наиболее эффективных вариантах исследований динамическая система рассматривается в развитии причинно-следственного процесса фрагментами детерминистического и стохастического моделирования. Согласование этих взаимодополняющих подструктур в общем алгоритме

59

позволяет решать локальные задачи как связанные разделы проблемы. Но комплексные подходы в настоящее время реализованы лишь в исследованиях объектов, сложность которых существенно ниже ОУ (например, электрические и электронные цепи с разрешающими уравнениями меньшего порядка, чем в анализе компонентов ОУ; производственные процессы, где сравнительно просто учитываются требования дефектности, четкости, корректности и полноты математической постановки задачи). Такие упрощенные аналоги могут лишь указывать на принципиальную возможность реализации гибридных подходов в анализе ОУ, но их осуществление требует преодоления значительных трудностей.

Методы экспертных оценок в практике исследований ОУ являются скорее доминирующей альтернативой, чем дополнением к численным методам [2]. Такому положению способствует наличие развитой базы теоретико-множественных экспертных подходов, различных по чувствительности упорядочения объектов по предпочтению (приведение к единому масштабу, введение весовых коэффициентов для субъективных оценок в зависимости от квалификации и информированности каждого эксперта, оценки в ранговых или бальных шкалах, попарные сравнения с применением бинарных соотношений, агрегирование количественных или качественных показателей с учетом кардинальных предпочтений и правила большинства и т.п.) [6]. Сформировалось мнение, что существующая база данных ОУ позволяет достичь с помощью экспертных оценок более высокого уровня достоверности результатов, чем при использовании численных методов. Учитывая важность таких выводов для организации исследований ОУ, сопоставим эти направления под указанным углом зрения.

Отметим, что они состоят из двух основных этапов. На первом этапе в обоих подходах выявляется совокупность «внешних» проявлений состояния подсистем (трещины, разрывы арматуры, выколы бетона, относительные и абсолютные смещения и другие характеристики конструкций). Методика реализации этого этапа является общей для двух направлений исследований. Сравнительные качества подходов выявляются на второй стадии, где с помощью существенно различающихся аппаратов выполняется переход от «внешних» факторов к оценке «глубинных» интегральных характеристик (несущей способности, надежности, долговечности, рисков ИТ. п.).

При использовании численного моделирования результаты экспертного анализа «внешних» проявлений вводятся как исходные данные в расчетную часть исследований. Она полностью формализована, что позволяет достичь высокой степени стандартизации и воспроизведения результатов даже при применении принципиально различных численных методов. Погрешность нахождения дискретных параметров определяется лишь точностью вычислительных алгоритмов и поэтому может быть доведена до требуемого уровня.

Реализация второго направления связана с обеспечением надежности, устойчивости и похожести индивидуальных оценок и исключением несопоставимых противоречий. Все члены достаточно многочисленной группы экспертов должны обладать высокой квалификацией, иметь глубокие знания об ОУ и придерживаться одинаковых принципов и критериев оптимальности, реализованных в единой детализированной системе оценок. Устранение потенциальных значительных расхождений требует выполнения специальных процедур обмена мнениями (например, по методу Дельфи, когда предварительно

60

вырабатывается итерационное решение по наиболее вероятностному значению какого-либо недвусмысленного признака) [6]. Хотя выполнение процедурных условий не вызывает сложностей, но основным требованиям формирования состава экспертной группы при существующем уровне индивидуальных и общих знаний об ОУ удовлетворить практически невозможно.

Поэтому этап преобразования «внешних» проявлений в «глубинные» показатели в варианте экспертных оценок может привести к существенным ошибкам, когда усредненные выводы оказываются даже хуже индивидуального прогноза. «Богатство» методов обобщения отдельных заключений может только завуалировать, но не исправить сравнительную «бедность» этого подхода: для условий ОУ точность варианта экспертных оценок может лишь приблизиться к точности численного моделирования.

Метод ретроспективного анализа [7] играет большую роль для официальной оценки состояния ОУ, поскольку он был использован в качестве базового при разработке документации, регламентирующей основные направления работ по стабилизации ОУ. При этом ставилась цель решения сложной задачи сравнительно простыми средствами: показатели начальной надежности и прогнозирование долговечности определялись на основе анализа перегрузок, выдержанных конструкциями за период существования. Положительный аспект этого подхода состоит в использовании реальных, а не нормативных данных о динамике внешних условий. Основу анализа составляет определение максимального параметра нагружения, зафиксированного в прошлом. Эта величина служит критерием «доказанной» прочности конструкции при определении вероятности отказа в будущем. Для решения задач, постановка которых обоснованно корректна, возможность использования такого подхода достаточно хорошо известна (работы А. Р. Ржаницина [8]). Реализация методики позволяет получить не только точечные, но и множественные оценки вектора состояния системы, размерность которого может превосходить количество непосредственно измеряемых выходных переменных структуры.

Однако использование такого подхода означает введение расчетных предпосылок, принципиально противоречащих условиям ОУ. В этой случае исключается возможность получения достоверных результатов. Во-первых, это утверждение следует из анализа предлагаемого авторами способа формального представления характеристик конструкций, где даже известные данные о структуре ОУ используются в существенно ограниченном объеме. Во многом уравниваются исходные оценки состояния элементов, заведомо имеющих различную степень повреждения. Во-вторых, функциональная связь между нагрузками и деформациями фактически задается в виде обобщенного закона Гука как для линеаризованной системы, хотя в ней существуют значительные дефекты, вплоть до не выявленных «грубых ошибок» [5, 7].

Необходимое для применения такого аппарата обоснование адекватности модели реальной системе ОУ потребовало бы установления устойчивой связи поведения динамического ОУ («черного ящика») с идентификаторами на длительном отрезке времени (адаптивные алгоритмы и модели). В принципе, для доказательства линейности какой-либо сложной системы требуются разноплановые наблюдения ее конструкций, а существующий на ОУ мониторинг не был организован таким образом, чтобы детально отражались процессы эволюции структуры.

Однако линейность системы ОУ невозможно доказать прежде всего потому, что она таковой не является. Поврежденные части структуры характеризуются очевидным наличием

61

обширных зон нелинейных деформаций, накоплений микрповреждений, макроразрушений и других нормативно недопустимых конструктивных дефектов. Это предопределяет возможность скачкообразного изменения параметров (в частности, хрупкого разрушения) не только вследствие экстремальных воздействий, но и деградиционных процессов. Каждое новое существенное нагружение не должно вызывать повторения прошлых аналогичных траекторий деформирования. Могут значительно изменяться критические области, скорости деформации, характеристики поперечных сечений, конфигурации, связи, условия контакта между элементами даже состав конструктивной системы. Поэтому применение такого подхода равносильно утверждению, что найдено линеаризованное решение многофакторной задачи оценки риска глобальной системы, включающей в себя большое количество заведомо дефектных узлов и элементов при существенно недостоверной информации об их состояниях и внутренних (потенциально разрывных) процессах. Оценки надежности структурных элементов декларируются без выполнения необходимого анализа корреляции между отдельными событиями в процессе обрушения системы, что не позволяет считать эти оценки информативными при выполнении вероятностного анализа рисков ОУ.

Указанный вариант анализа можно было бы рассматривать не более чем как оценку отдельной группы экспертов, но использование этих иллюзорных результатов в регламентирующих документах стабилизации подчеркивает большую практическую опасность решений [7]. Она определяется уменьшением расчетного риска обрушения конструкций, поскольку реальные деструктивные явления могут возникнуть раньше сроков, «доказательных» в смысле [7].

Сертифицированные программные средства, реализующие методы системного анализа безопасности, используются практически во всех разделах исследований ОУ. Применяются эффективные компьютерные технологии и наиболее совершенные версии программных комплексов, регламентированных во многих странах не только как стандартные средства производственного назначения, но и как многоцелевые разработки научного сопровождения решения проблем экстремальных объектов атомной энергетики и других отраслей.

Однако применение даже такого мощного арсенала показывает, что реальные возможности программ существенно ограничиваются при учете специфики ОУ. Серьезные затруднения возникают на каждом этапе анализа. Например, подключение к системе мировых метеоцентров позволяет составить аргументированный прогноз движения и осадения пылевого облака после выброса из ОУ, но при этом оказывается, что моделирование ключевой фазы формирования облака внутри и вблизи ОУ не имеет необходимого методического обеспечения.

Анализ существующих программных средств показывает, что только в некоторых из них есть зачаточные подструктуры алгоритмов оценки риска (в частности, этапа определения обобщенной реакции объекта на деградиционные и экстремальные воздействия). В специализированных программах детерминистического расчета конструктивных систем развиты ветви нелинейного анализа деформирования элементов до их нормативных предельных состояний. Но, несмотря на существование фундаментальной базы механики разрушения конструкций, эти комплексы не ориентированы на моделирование следующих за предельными стадиями накопления повреждений, обрывов связей, больших перемещений и падений фрагментов с превращением их в источники импульсного нагружения

62

изменяющейся структуры. Соответственно в средствах реализации вероятностных методов недостаточно проработаны аналогичные алгоритмы переходных процессов и логических деревьев событий (отказов).

Ограничения возможностей анализа безопасности ОУ на основе программных средств, получивших наибольшее распространение в инженерной практике, объясняются коммерческой направленностью разработки комплексов. Они предназначены, прежде всего, для решения многочисленных стандартных классов задач, а не для выполнения сложных научных «одноразовых» исследований. Поэтому расширение традиционных областей их

приложений на ОУ требует достаточной осторожности и существенной целенаправленной модернизации [8, 9].

Оценка методов системного анализа с помощью их применения для исследований безопасности ОУ доказывает, что достижение достоверности результатов требует не столько строгого следования действующим нормативным документам, сколько проблемного развития общих принципов и наукоемких методов, представленных в настоящее время только на уровне рекомендаций МАГАТЭ [1-4, 8]. Необходим последовательный пересмотр отраслевой нормативно-технической и методологической базы применительно к ОУ, что должно быть одним из ключевых моментов выполнения экспертиз его текущего и прогнозируемых состояний.

На каждом этапе анализа система ОУ может представляться моделями различной сложности, но в связи с высокой неопределенностью ее характеристик уровень абстрагирования должен тщательно обосновываться. Получение требуемой точности результатов обусловлено не только дифференцированной минимизацией погрешностей отдельных групп исходных параметров и корректностью математической постановки задачи, а также зависит от качества всех разделов исследований.

На основе анализа существующих средств оценки рисков сформулирован вывод о том, что для исследования системы ОУ целесообразно использовать рациональное сочетание методов [1, 8, 9):

- проблемно-ориентированного инструментального, экспериментального и обследовательского формирования базы данных;
- корректного численно-модельного (вероятностного и детерминистического) анализа риска при максимально возможном расширении области его применения;
- экспертных оценок исходных, промежуточных и результирующих данных при минимизации этой части анализа.

Методика формирования исходной информации для анализа безопасности системы ОУ предполагает использование на основных этапах детерминистических методов для моделирования поведения структуры ОУ и выполнение стохастического анализа внешних воздействий (постулируемых событий). Данные о составе и свойствах элементов системы ОУ не могут формироваться в соответствии с регламентированными требованиями технической эксплуатации или предреконструкционных изысканий промышленных объектов. В связи с экстремальными особенностями ОУ этот процесс включает в себя визуализацию элементов структуры и анализ чертежей, фото- и видеоматериалов ОУ и 4-го энергоблока, что сопровождается сравнительно небольшим объемом экспериментов, измерений и поверочных расчетов. Полученные непосредственно из ОУ однозначно понимаемые данные являются лишь фрагментами информации, не достаточными для достоверной экспертизы. Часть наиболее существенных деталей оказывается «за кадром»,

63

а документально восполнить эти пробелы трудно или даже невозможно, что обычно предопределяет необходимость использования методов экспертных оценок для дополнения информации. В таком случае гарантией качества выводов фактически служит лишь опыт исследователей, анализирующих натурные данные. Это не исключает получения различных (в пределе - противоположных) выводов об одном и том же элементе даже при участии весьма квалифицированных исполнителей и нужна целенаправленная работа для устранения причин принципиальных разногласий экспертов.

В качестве иллюстрации приведем известный эпизод выполнения оценки сейсмостойкости блока В при работе над ТЭО [10]. Сначала НИИСК на основании обследований определил, что блок сейсмостоек даже при землетрясении в 7 баллов. Затем «Альянс», желая иметь собственную точку зрения по этому ключевому вопросу, попросил представить ему конструкторскую документацию для численных исследований. Исполнительная документация была представлена в неполном объеме, но ее предлагалось дополнить результатами экспертизы НИИСК. Однако при формировании исходных данных для расчета «Альянс» строго использовал лишь достоверную первичную информацию в

сочетании с принципом консервативных оценок, что привело к выводам о неустойчивости блока.

Но блок В достаточно доступен для прямых обследований. Поэтому в результате дополнительного анализа проектной документации и целенаправленных изыскательских работ НИИСК оперативно завершил формирование корректной базы данных. Очевидно, что сейчас при наличии достаточно полной информации расчетная экспертиза блока В, квалифицированно выполненная даже разными организациями, не могла бы привести к существенно различающимся выводам.

Подобные примеры показывают принципиальную возможность верификации методик экспертиз во многих аспектах исследований ОУ. Однако продолжения использования такого дорогостоящего и медленного варианта как ведущего в наполнении базы данных приведет к еще большему отставанию информационного обеспечения от динамических требований безопасности ОУ. Сокращение и удешевление этапа формирования исходных данных без снижения их качества является важным условием оптимизации исследований ОУ. В этом отношении чрезвычайно перспективной является комплексная методика численного моделирования и натурных обследований [1, 8, 11]. Ее структура естественным образом учитывает экстремальную индивидуальность ОУ, что позволяет получить достаточно информативные данные о существующем состоянии (в частности, о труднодоступных зонах) на основе моделирования процессов формирования ОУ, начиная от полностью определенного исходного состояния 4-го энергоблока.

Анализ и отбор исходных событий текущей эксплуатации ОУ является основным содержанием первого этапа оценки риска. Регламентирующая документация содержит полный перечень и параметры нагрузок и воздействий для детерминистических расчетов, а также исходных событий или отказов - для вероятностного варианта [1, 2, 8]. Эти данные нормированы на основе статистических обобщений результатов прямых измерений, обследований и экспериментов по обширным группам однотипных объектов, климатических и территориальных макрорайонов. Исследования показывают, что есть группы параметров, которые существенно отличаются от результатов анализа архивных материалов и

64

наблюдений ОУ. Эти расхождения характерны как для медленно протекающих естественных воздействий, так и для характеристик экстремальных маловероятных событий. Поэтому основная задача этапа состоит в аналитическом обобщении и уточнении таких данных.

Анализ и отбор исходных событий при разработке проектов стабилизации ОУ выявляет существенные недостатки регламентирующей документации. С одной стороны, стабилизирующие мероприятия должны быть реализованы в кратчайшие сроки и рассчитываются на сравнительно небольшой период действия до начала основных преобразований ОУ. С другой стороны, необходимость удовлетворения требований норм учета маловероятных, но весомых негативных событий приводит к проектированию капитальных усилений конструкций, что характеризуется чрезмерными для современных условий затратами при сравнительно невысокой эффективности защитных барьеров [8, 10].

Для устранения этих противоречий можно воспользоваться рекомендациями МАГАТЭ, которые позволяют в соответствии с решением руководящих органов исключать из рассмотрения исходные события, вероятность возникновения которых сравнительно невелика. Целесообразность такого сокращения следует и из нормативных документов по учету плановых сроков существования строительных объектов. Поэтому при определении ведущих критериев оценки рисков состояний ОУ был предложен «мягкий» вариант, сокращающий регламентированный список исходных событий [1,

12]. Однако это

предложение следует рассматривать как первичное, требующее дополнительного серьезного обоснования. Оно может не привести к полному исправлению ситуации, поскольку частотная компонента является лишь одним из двух ведущих сомножителей, используемых при определении функции риска. Если из списка исходных событий механически исключить все реализации, маловероятные для 30-50 летнего срока существования ОУ, то из анализа выпадут наиболее тяжелые процессы.

Но уже сейчас известны факты, показывающие, что такое решение может неоправданно завязать оценку безопасности. Например, при изменении частотного критерия уровень экстремальной снеговой нагрузки будет существенно уменьшен. Однако данные метеонаблюдений за районным ЧАЭС свидетельствуют о том, что в течение последних лет снеговая нагрузка неоднократно превосходила нормативные значения [1, 8]. Поэтому отказ от «жесткого» учета всех исходных событий должен иметь строгое аналитическое обоснование. В частности, на этапе стабилизации ОУ следует разработать несколько различных по капитальности технических и технологических предложений и принимать управляющие решения только в результате достаточно достоверного анализа основных показателей: с одной стороны, требуемых затрат и сроков реализации, и с другой стороны, оценки вероятности и тяжести негативных последствий, социально допускаемых в рассматриваемом варианте.

Обобщенная реакция ОУ на втором этапе анализа рисков определяется в результате моделирования развития штатных и экстремальных ситуаций в аварийные процессы, с негативными последствиями [1, 8]. ОУ представляется в виде сложной комбинированной системы строительного или технологического производства с высоким уровнем неопределенности характеристик составных элементов и узлов.

Использование нормативных (консервативных) подходов к расчету ОУ как к объекту атомной энергетики показывает, что структура ОУ не в состоянии воспринять наихудшие сочетания воздействий, включающие в себя землетрясение в 7 баллов, торнадо, падение

65

летательного аппарата и т. п. [1, 8, 10]. Высокий уровень нагрузок определяется методикой регламентированного детерминистического анализа, в которой заложены идеи концепции максимально возможного события [4]. Построение более прогрессивной процедуры анализа риска требует моделирования эффектов взаимодействия элементов структуры ОУ на детерминистической основе, поскольку отсутствуют многие необходимые статистические данные.

Эти предпосылки определяют выбор основного варианта численного моделирования отказов и переходных процессов, приводящих к изменениям системы [1, 8, 9, 11]. В общем случае система состоит из элементов различной структуры и размерности, описывается связанными нелинейными динамическими разрешающими функциями разной физической природы. Используются гибридные численно-модельные расчеты компонентов ОУ и вероятностные оценки случайных воздействий и изменений характеристик при подтверждении результатов вычислений натурными данными по реперным узлам.

Основным средством анализа является метод конечных элементов, который наиболее приспособлен для определения сложных процессов деформирования. Для исследования массивных элементов и концентрации напряжений используется численно-аналитический метод потенциала, позволяющий принципиально уменьшить размерность разрешающих уравнений по сравнению с методами, требующими дискретизации всей расчетной области. Нестационарное взаимодействие твердых тел с жидкостью или газом под действием быстро изменяющихся нагрузок описывается разностными методами численного моделирования полиагрегатных сред. Для учета параметров, задаваемых на основе статистических обобщений, используется разветвление аппарата сочетания детерминистических и вероятностных подходов.

Программно-технический комплекс, реализующий методы численного моделирования, имеет структуру, ориентированную на применение принципиально различающихся алгоритмов в единой среде управления при одинаковой исходной информации. Комплекс открыт для подключения других программных средств. Возможность одновременного использования различных программ и методов позволяет выбирать конкретные алгоритмические варианты подструктуры для каждого класса задач, рациональные по точности результатов и эффективности вычислительных процедур.

Оценки возможных негативных последствий и выработка управляющих решений завершает процесс анализа риска [1, 8]. С этой целью моделируются характерные варианты реализации исходных событий с развитием процессов, приводящих к аварийным

отказам компонентов системы ОУ. Основным разделом является определение последствий обрушения конструктивной структуры с выбросом радионуклидов в окружающую среду. Рассмотрены наиболее вероятные сценарии разрушения несущих и ограждающих конструкций, из которых особую опасность представляет падение покрытия на завал центрального зала. Выполнен анализ динамического напряженно-деформированного состояния ОУ при развитии аварий. Определены критические участки структуры и параметры переходных процессов, которые следует учитывать при организации мониторинга ОУ. Исследованы фазы подъема пыли при обрушении конструкций, формирования радионуклидного облака, его перемещения и оседания. Получены оценки количественного и качественного состава пылевого выброса, определены возможные варианты загрязнения

66

территорий в различных погодных условиях, выявлена степень вероятного загрязнения (в результате аварийного разрушения ограждающей защитной оболочки ОУ радионуклидное облако выходит за пределы 30-километровой зоны). Численное моделирование и оценка рисков негативных процессов позволяет выработать защитные решения. Показана возможность оперативного получения и оценки вариантов управления на различных примерах формирования технических и технологических предложений по стабилизации конструктивной структуры и разработке аварийной системы пылеподавления.

Реализация методики анализа безопасности ОУ выполнена в комплексной оценке риска основных источников опасности в соответствии с полным перечнем регламентированных исходных событий [1, 8]. В качестве иллюстрации представим один из характерных параметров использования этой методики - анализ падения летательного аппарата. Это возможное воздействие на ОУ выделяется среди нормируемых внешних событий, вызванных деятельностью человека, благодаря своей очевидной маловероятности и неопределенности, но регламентируемой значительности. В соответствии с действующими нормами анализ безопасности должен включать в себя оценку негативных последствий прямого падения на объект или в опасной близости от него самолета. Такие разрушительные воздействия могут оказать значительное влияние на формирование требований, предъявляемых к проектам стабилизации и дальнейшего преобразования ОУ при жестком учете существующих нормативных положений.

Однако обобщенная постановка задачи, сформулированная в результате статистического анализа авиакатастроф и условий безопасности полетов гражданской авиации за последние годы по данным ИКАО [13], не учитывает конкретных реальностей расположения ОУ и потому корректность ее применения вызывает обоснованные сомнения. Нормативная низкая частотная вероятность этого события давала возможность для предложений об его исключении при формировании смягченных критериев безопасности ОУ. Но недостаточность аргументации, основанной на анализе одной лишь частотной компоненты функции риска, была очевидной.

Выработка аргументированного управляющего решения о порядке учета данного события требует реализации всех характерных этапов. При конкретизации постановки задачи определение расчетной частоты событий и степени их воздействия на систему ОУ должно осуществляться исходя из анализа полетной обстановки в зоне ЧАЭС. В Украине эксплуатируются самолеты и вертолеты с широким диапазоном изменения расчетных параметров от Ан-225 (Мрия) и Ан-124 (Руслан) до Як-40, Ан-2 и Ми-8. Вероятность пересечения маршрутом полета зоны ЧАЭС для разных типов самолетов существенно различается. Для большинства типов определенная вероятность падения непосредственно на ОУ или в опасной близости от него оказывается существенно ниже нормативной, и только для некоторых классов приближается к ней. Но в районе ЧАЭС проложены маршруты полетов вертолетов, осуществляющих наблюдение за Зоной отчуждения. Возможность авиакатастрофы с падением этого аппарата в зону, опасную для ОУ, можно определить в соответствии с методикой безопасности полетов с учетом курсов, режимов и других характеристик. Вероятность такого события оказывается существенно выше нормативной.

67

На втором этапе для определения обобщенной реакции системы ОУ на падение летательных аппаратов использовались конечноэлементные и граничноэлементные модели структуры ОУ и оболочечные расчетные схемы самолетов. Для определения эффекта действия на конструкцию ОУ была разработана модель соударения при упругопластической деформации контактирующих систем.

Для оценки реакции ОУ параметры механических воздействий (импульсное приложение нагрузки к конструкции ОУ, величина давления в момент удара, скорость падения перед соударением, вибрация грунта при попадании самолета на промплощадку в пределах дистанции отбора ит. п.) рассматриваются не только как данные для решения основной задачи. Учитывается также вероятность других возможных комплексных последствий, моделируются сценарии развития возможного пожара и взрывов, оценивается сопротивляемость защитных барьеров. Определение величины дистанции отбора показало, что падение аппарата на промплощадку уже в нескольких десятках метров от ОУ не вызовет обрушения конструкций. Однако расчет напряженного состояния ОУ при добавлении к массовым нагрузкам импульсного воздействия в каком-либо месте ОУ приводит к выводу, что несущие конструкции ОУ не выдержат такого удара, и объект обрушится.

На следующем этапе моделируется процесс пылевого выброса из ОУ и распространения образуемого облака за пределы ОУ, что является основой для оценки уровня негативных последствий. Завершает исследование построение функции риска для разных классов самолетов (вертолетов) и вариантов развития аварийных процессов. Риск представляется как произведение вероятности падения летательного аппарата на суммарную активность радиоактивных веществ, покидающих ОУ.

В результате выполненного анализа обоснован вывод о целесообразности исключения данного исходного события из нормативного перечня, но только при принятии рекомендуемых управляющих решений о регламенте выполнения полетов над зоной ЧАЭС.

Еще одним характерным примером таких исследований служит оценка рисков взрыва за пределами ОУ [1, 8]. Возможность реализации этого события определяется наличием разнообразных источников пожаро- и взрывоопасности, которые могут находиться достаточно близко от ОУ и приводить к разнообразным сценариям развития негативных процессов. Однако в соответствии с регламентирующей документацией все возможные варианты реализации этого события заменяются требованием, чтобы сооружение выдерживало давление ударной волны до 10 кПа с продолжительностью фазы сжатия 1 с. Необоснованность такого условия определила необходимость конкретизации параметров, последствий и управляющих решений с учетом реального для ОУ расположения и видов источников взрывоопасности при проведении ремонтно-монтажных работ, падения самолета на промплощадку, аварии на железной или автомобильных дороге и т.п. Результаты конкретизированного анализа взрывных воздействий существенно отличаются от регламентированных данных.

Выводы

1. Доминирующие в настоящее время методы экспертных оценок, «ретроспективного анализа» и ряда других подходов [2, 7] не позволяют получить количественные оценки рисков, отражающие реальное состояние ОУ. Опасность их использования заключается в

68

возможности значительного занижения уровня риска существования и стабилизации ОУ, что находит отражение в официальных программных документах [14].

2. История развития методологии оценки возможных рисков является аналогом, который опережает процесс формирования нормативно-технической базы ОУ, выявляет ее несоответствие современному научному уровню и обосновывает необходимость модернизации аппарата исследований ОУ.

3. Для анализа безопасности ОУ целесообразно использовать системный подход, в котором ОУ описывается многоуровневой структурой и связанными задачами различных отраслей; эффективность оценки риска ОУ достигается рациональным сочетанием

детерминистических и вероятностных методов численного моделирования с целенаправленными натурными обследованиями ОУ при минимизации экспертных оценок.

4. В результате реализации такого подхода выполнен полный регламентированный цикл начальных исследований безопасности ОУ и обоснована реальность эффективной разработки нормативно-методической базы, численных моделей, программно-технического комплекса и средств мониторинга, позволяющих на всех этапах оперативно оценивать риск существования и преобразования ОУ.

1. *Отчет по безопасности (оценка риска) объекта «Укрытие» реактора № 4 Чернобыльской АЭС // Отчет по НИР, МНЦТ «Укрытие» по ген. договору 1/95, тема 4. - Арх. № 3501. - Чернобыль-Киев, 1995. - 291 с.*
2. *Состояние ядерной, радиационной и экологической безопасности объекта «Укрытие» // Отчет по НИР, ИВ ТЭМ РНЦ «Курчатовский институт» по этапу 1 договора №19-М ОС/95, № 130-09/38. - Москва, 1995. -232 с.*
3. *Швыряев Ю. В. и др. Вероятностный анализ безопасности атомных станций. Методика выполнения. - М.: ИЭА им. И. В. Курчатова, 1992. - 266 с.*
4. *Probabilistic Risk Assessment: Applications for Nuclear Reactor Inspection / D. J. Kelly, T. J. Leahy etc. Oct. 1992, Idaho National Engineering Laboratories, Idaho Falls, ID Prep, for the U. S. Nuclear Regulatory Commission under DOE contract No. DE-AC07-761D01570. - 280 p.*
5. *Аугустини Г., Барата А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании. - М.: Стройиздат, 1988. - 584 с.*
6. *Миркин Б. Г. Проблема группового выбора. - М.: Наука, 1974. - 256 с.*
7. *Прогнозирование долговечности укрытия над разрушенным четвертым энергоблоком Чернобыльской АЭС (строительная часть) // Отчет по НИР, НИИСК по договору № 877 от 01.10.94. - Киев, 1995. - 168 с.*
8. *Исследование и численное моделирование ответственных конструкций и грунтов основания объекта «Укрытие» // Отчет по НИР, НИИМБП / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Киев, 1996. - Десять книг.*
9. *Veryuzsky Y. V. Theoretical and practical methods for research of structures for extreme environments / The First International Design for Extreme Environments Assembly. University of Houston, p. D/C. 3.1.2, 1991.*
10. *Stabilisation of the existing shelter and the containment of both the existing shelter and the damaged remains of reactor 4 at the Chernobyl Nuclear Power Plant - TACIS contract WW 92.04/01.01/B.029.*
11. *Дополнительная экспертиза состояния строительных конструкций укрытия аварийного блока ЧАЭС // Отчет по НИР, НИИМБП по договору № 5 от 14.01.94 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Киев, 1994. - 9 кн.*
12. *Исходная техническая информация по проблеме блока № 4 Чернобыльской АЭС // Разработка для КЭС ПО ЧАЭС, МНЦТ «Укрытие», НИИСК. - Чернобыль, 1995.*
13. *Самусь В. М. Количественные оценки безопасности полетов. - Киев, Киевский институт инженеров гражданской авиации, 1988. - 80 с.*
14. *Купный В. И. Объект «Укрытие»: вчера, сегодня, завтра (нынешнее состояние и перспективы Чернобыльского «САРКОФАГА»), Working Material International Forum: «One Decade after Chernobyl: Nuclear Safety Aspects». - Vienna: IAEA, April 1-3, 1996, pp. 227-248.*

Получено 11.04.96