

Ю. В. Верюжский

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ» КАК ПРЕДСТАВИТЕЛЯ КЛАССА ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Показана эффективность распространения на область исследований объекта «Укрытие» (ОУ) методологии решения проблем экстремальных объектов, построенной на межотраслевом уровне. ОУ с функционально связанными компонентами рассматривается как система многофакторного анализа ядерной, радиационной, экологической и общетехнической безопасности в условиях эксплуатации и преобразований. Ведущий элемент исследований - прогнозирование поведения деградирующей конструктивной структуры ОУ при экстремальных воздействиях. Развивается универсальный аппарат детерминистически-вероятностного численного моделирования, оценок риска, экспериментальных и проектно-исследовательских работ. Индивидуализированным средством учета особенностей ОУ является комплексная методика определения состояния системы (прежде всего - в труднодоступных зонах) на основе последовательного анализа запроектной аварии реактора, разрушения 4-го энергоблока и формирования ОУ.

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В работе представлены результаты обобщения ряда научно -исследовательских и проектно - изыскательских работ, объединенных одним научным, техническим и методическим направлением [1 - 13], целью которого является реализация планов и программ по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС при создании научного и проектного обеспечения перевода объекта «Укрытие» (ОУ) в контролируемое состояние. Разработка технических и технологических решений базируется на анализе поведения системы ОУ и оценке риска его негативного влияния на персонал, население и окружающую среду при нарушении конструктивной структуры вследствие развития деградационных процессов, при реализации экстремальных воздействий или преобразованиях системы.

2. ЭКСТРЕМАЛЬНОСТЬ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»

ОУ является одним из наиболее сложных и ответственных представителей класса экстремальных объектов (ЭО) - зданий, сооружений, машин, аппаратов, оборудования и средств индивидуальной защиты человека, специально предназначенных или случайно попавших в естественные или искусственно образованные области повышенного риска - экстремальные условия и среды. Частным случаем ЭО являются объекты, поврежденные запланированными или сверхнормативными воздействиями и предназначенные для продолжения эксплуатации в поставарийном или частично реконструированном состоянии [9, 10].

С развитием человеческой деятельности этот класс непрерывно расширяется, поскольку к нему относятся объекты в районах стихийных бедствий и экологических катастроф, в труднодоступных и неблагоприятных для обитания зонах, в подземном, подводном, воздушном и космическом пространстве. Проблематика ЭО инициировала создание многих эффективных рациональных конструкций и технологий.

Однако распространение ЭО связано не только с научно-техническим прогрессом, но и с вступлением человечества в эпоху повышенного риска самоуничтожения. Существование в новых условиях предопределяет необходимость управления рисками не только на основе традиционного исследования реализованных факторов опасности. Требуется прогнозировать и предупреждать события, которые могут развиваться в тяжелые аварийные

3

ситуации и нанести значительный ущерб. В результате поиска средств ослабления воздействий при реализации негативного потенциала ЭО и разработки адекватных компенсирующих механизмов сформировалось научное направление, методологическую основу которого составляет теория рисков ЭО [7, 9, 14-16].

Оценка рисков включает в себя анализ и идентификацию опасности исходных событий и отказов, моделирование негативных процессов, прогнозирование ущерба и компенсационных затрат, выработку рекомендаций по управлению или снижению уровня опасности возникающих явлений и

легко приводятся в штатное состояние в условиях базирования. Но возникновение внепроектных повреждений вдали от базы могут превратить задачу диагностики и ремонта в трудноразрешимую проблему, имеющую общие элементы постановки для обоих объектов. Эти характерные аспекты присущи также ОУ, который при исключении факторов ядерной и радиационной опасности превратился бы в заурядный объект строительной реконструкции [7].

Выделяются пять основных особенностей ЭО:

- стандартно недопустимая запредельность испытанных или постулируемых состояний объекта и окружающей среды;
- чрезвычайная ответственность функционального назначения;
- доминирующее значение решения основной задачи (доминанты ЭО), которой подчиняются все другие цели;
- исключительная сложность и индивидуализированность проблемы, имеющей комплексный межотраслевой характер;
- определяющая роль исследований, которые должны исключить ошибки со значительными негативными последствиями.

Анализ ОУ показывает, что ему в полной мере присущи все свойства ЭО, это нашло отражение в многочисленных документах и публикациях [4, 7, 17 -21]. Постановка представляемых исследований учитывает приведенные ниже основные условия.

В общем случае в состав системы к ОУ добавляются функционально связанные энергоблоки, промплощадка и Зона отчуждения. Система характеризуется высоким уровнем риска реализации комплекса опасностей. Значительная часть ОУ состоит из элементов разрушенного 4 -го энергоблока, и безопасность системы во многом определяется надежностью ее конструкций, обрушение которых может привести к изменению конфигурации ядерноопасных материалов, а также выбросу радионуклидов в окружающую среду и другим негативным последствиям. ОУ не соответствует требованиям нормативных документов для какого-либо класса атомной энергетики. Нет полной документации исполнительного типа, содержащей регламентированные сведения об ОУ, что не позволяет применить стандартные процедуры расчета конструкций. Методы прямых обследований и измерений в значительной части ОУ малоэффективны из-за высокого уровня излучения и загромождений путей доступа. Для выяснения уровня негативного потенциала ОУ необходима модернизация отраслевых методик.

Доминантой ОУ, согласно его статуса, является первоочередная задача приведения аварийного блока в контролируемое состояние, необходимое для обеспечения ядерной и

4

радиационной безопасностей [7, 19]. Основной ее компонент - стабилизация структуры или использование таких технологий ликвидации опасностей ОУ, при которых обрушение конструкций не вызовет существенных негативных последствий.

С этой целью исследуются [1-8]:

- потенциально ненадежная и разносторонне уязвимая сложная система, состоящая из качественно различных компонентов (конструктивная структура в полиагрегатной среде);
- динамические переходные бифуркационные процессы с нечеткими критериями потери устойчивости на участках траектории;
- разнохарактерные исходные события и отказы (ошибки человека, деградиационные процессы, экстремальные воздействия и т. п.);
- существенно неполные и некорректные компоненты баз данных;
- технические и технологические средства контроля, выработки управляющих решений и реагирования в аварийных режимах.

Главная трудность проблемы состоит в необходимости получения в короткий срок высокой точности результатов при экстремальности условий, что усугубляется чрезвычайной стоимостью ошибок, поскольку по консервативным оценкам даже локальные воздействия на систему ОУ могут привести к недопустимым эффектам [7, 8].

3. ОБЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИИ ПО ТЕМЕ

Основным препятствием для решения доминирующей задачи ОУ является неопределенность данных о факторах рисков. Среди них ключевыми являются параметры источников ядерной, радиационной и других опасностей, а также характеристики поврежденных конструкций.

Для получения требуемой информации за прошедшие годы на ОУ выполнен значительный объем работ. В результате преодоления чрезвычайных трудностей накоплены разнообразные данные о компонентах системы ОУ. Часть этих характеристик можно использовать для построения фрагментов адекватных моделей ОУ и верификации результатов косвенных исследований. Но в целом исходной информации об ОУ недостаточно, о чем свидетельствуют попытки анализа состояния ОУ, которые фактически закончились неудачами, хотя выполнялись ведущими организациями [17,19 -21].

В качестве примера можно привести результаты оценки технологической идеи омоноличивания бетоном основной части внутреннего пространства ОУ с целью многолетней его консервации. Исследования выполнялись тремя группами специалистов высокого уровня, которые пользовались одинаковыми сертифицированными методиками и мощными программными средствами. Различия в подходах определялись лишь граничными условиями постановок задач, фиксирующих расположение ядер неопасных материалов [8].

Были получены три математических результата, обосновывающие принципиально различающиеся предложения. В первом варианте доказывалось, что многолетняя безопасность монолитного сооружения будет гарантирована даже при использовании бетона обычного состава. Во втором было определено, что для устранения возможностей возникновения негативных локальных тепловых и ядерных эффектов при омоноличивании зон с источниками опасности следует использовать специальные технологии и материалы. Третье заключение свидетельствовало о полной несостоятельности этой идеи, поскольку ее реализация должна привести к недопустимым последствиям.

5

Аналогичная ситуация возникает при оценке надежности структуры ОУ, где относительно одних и тех же ее блоков различными высококвалифицированными специалистами делаются взаимоисключающие выводы, хотя для выполнения таких экспертиз существует фундаментальная база строительной механики и теории конструкций. Эти средства анализа позволяют не только достоверно рассчитывать стадии упругого и нелинейного деформирования элементов с помощью нормативных критериев предельных состояний, но и моделировать их поведение вплоть до полного разрушения. При достаточно точном представлении параметров повреждений и предыстории запредельной работы элементов можно определить остаточную несущую способность и другие характеристики «критических зон», а также всей структуры ОУ.

Но достоверность исходной информации обеспечена лишь для части поврежденных конструкций ОУ (для мало пострадавших фрагментов используются нормативные методики, полностью разрушенные зоны исключаются). Характеристики повреждений различной тяжести остальных конструкций 4-го энергоблока, вошедших в состав ОУ, находятся в плохо обусловленном диапазоне между этими двумя полюсами, и в зависимости от выбора предпосылок формирования исходной информации могут быть получены значительно различающиеся результаты [7, 8, 20, 21].

Образовались два основных направления оценок состояния ОУ. В первом направлении строго используются положения норм атомной энергетики. При недостаточной определенности условий задачи они дополняются наихудшими из возможных на основе принципа консервативности [20]. При таком подходе дефектная структура ОУ рассчитывается на действие чрезмерных нагрузок, поскольку необходимость учета экстремальных ситуаций жестко регламентируется, хотя они имеют весьма низкую вероятность возникновения: интенсивные землетрясения, ураганы и торнадо со значительными скоростями воздушных потоков и импульсами давлений, падения летательных аппаратов, взрывы внутри и вне ОУ, пожары, особо неблагоприятные сочетания различных факторов [7]. Положение усугубляется консервативностью оценок развития ослаблений конструкций вследствие коррозии, эрозии, ползучести и охрупчивания

материалов, снижения трещиностойкости, осадок и обводнения основания, других физических и химических деградаций.

В результате выясняется, что структура ОУ не удовлетворяет действующим критериям. Отсюда выводы о возможности аварийных разрушений защитных барьеров ядерной и радиационной безопасности, а также о высоком уровне негативных последствий наиболее тяжелых (хотя и маловероятных) исходных событий [7, 8, 20].

На фоне указанных исследований даже весьма осторожные официальные заключения звучат неоправданно оптимистично:

«Разрушенные конструкции энергоблока № 4

характеризуются ... небольшим количеством критических зон с состоянием близким к предельному по несущей способности и деформативности, ... для отдельных наиболее нагруженных железобетонных конструкций консервативные оценки приводят к сроку службы 8 -15 лет» [19, 21].

Исходя из принципа консервативности ряд организаций обращают внимание ЧАЭС на необходимость немедленного принятия мер по усилению некоторых критических зон. Так, ВНИПИЭТ, дающий в целом удовлетворительную оценку состояния конструкций» ОУ,

6

выражает обеспокоенность в связи с ненадежностью зоны влияния схемы «Е» и настаивает на замоноличивании части реакторного пространства. НИИМБП подчеркивает недопустимость выявленного в ходе комплексных численно-модельных и обследовательских работ опасного состояния ряда несущих конструкций (в частности структур, связанных с балками Б1, Б2: южной выхлопной шахты, стоек под барабан-сепараторами, узлов стены по оси 50). Эти предостережения прямо или косвенно подтверждаются обследованиями, проведенными персоналом ОУ и обнаружившими значительные подвижки ряда ответственных элементов и узлов.

Если строго руководствоваться результатами консервативного подхода, то следует сделать заключение о возможности обвального «рецидива» Чернобыльской аварии и о недостаточной подготовленности к такой чрезвычайной ситуации соответствующих организаций. В этом отношении основную негативную роль может сыграть слабость базы, предназначенной для обеспечения эффективного предупреждения, оперативной организации защитных мероприятий, локализации и ликвидации возможных тяжелых аварий на ОУ (даже не разработаны модели развития негативных процессов, которые должны определять противоаварийные разделы технологических регламентов ЧАЭС, варианты технических и технологических решений с проектной документацией, арсенал защитных средств и т. п.).

Стратегия текущей эксплуатации и преобразования ОУ построена на основе «смягчения» нормативных требований атомной энергетики. Обоснованию этой позиции служат не только несоответствие ОУ стандартным классам и сохранение статуса ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, но и более существенные доводы. Так, разработка проектов стабилизации структуры ОУ показала, что принцип консервативности приводит к решениям чрезвычайно высокой стоимости [1, 20]. Однако нелогичность таких капиталовложений определяется двумя основными факторами.

Во-первых, ОУ как временное сооружение не должен быть надежнее, чем другие объекты ЧАЭС и капитальные сооружения, возведенные без учета воздействий столь высокого уровня. (Это еще раз подтверждает необходимость создания карт рисков Украины.)

Во-вторых, отраслевые методики, использующие упрощенные расчетные схемы и значительные коэффициенты запаса надежности, не позволяют учесть особенности ОУ и поэтому не обеспечивают его безопасности по окончании реконструкции и при выполнении работ.

Сказывается незавершенность «переходного этапа» развития нормативнотехнической базы, которая сохраняет ряд устаревших положений и недостаточно согласуется с рекомендациями Европейских стандартов, МАГАТЭ и России, где учитываются современные детерминистические и вероятностные направления [7, 8]. По существу, в действующих нормах в качестве основы используются идеи концепций максимально возможных событий, глубоко эшелонированной защиты и других «грубых», но гарантирующих безопасность, методик оценок рисков [14-15]. Такие подходы эффективны

при проектировании малых ядерных установок, расположенных в достаточно удаленных местах, но они несостоятельны при анализе промышленных реакторов и, тем более, - для ОУ.

Поэтому в качестве основного регламентировано более гибкое направление методологии исследований ОУ как сочетание экспертных и расчетных оценок на уровне

7

существующих знаний с целью последовательного углубления представлений об ОУ и увеличения сроков действия обоснованных прогнозов [7, 18]. При определении рационального соотношения расчетных и экспертных долей в этом комбинированном подходе превалирует мнение о практической неустранимости дефектов исходной информации и недостижимости нормативной точности численных исследований. Это приводит к существенному сокращению области расчетных обоснований. Метод экспертных оценок безусловно доминирует даже при принятии весьма ответственных решений.

Однако для получения достоверных обобщений экспертных оценок требуется выполнить ряд условий. Главным из них является формирование комиссии из статистически представительного числа высококвалифицированных независимых специалистов из различных организаций, имеющих всестороннее представление о проблеме.

Но можно собрать и небольшое число экспертов, глубоко и непосредственно знающих систему ОУ. Основу представлений каждого специалиста составляет сравнительно узкая выборка его индивидуальных наблюдений. Даже самые компетентные лидеры при экспертизе обладают меньшей информацией, чем при реконструкции обычного объекта, где анализ проектной документации дополняется данными инструментального определения физико-механических и геометрических параметров. В сложных случаях оценок, как показывает практика, эксперты разделяются на две группы; процедура согласования усиливает решимость меньшинства оставаться при своих мнениях, но в большей части побеждают интересы лидеров, управляющих результатами.

Поэтому на существующем уровне знаний специалистов об ОУ принципиально невозможно обеспечить выполнение методических условий успешной реализации группового выбора на основе агрегирования индивидуальных, предпочтений экспертов и добиться хотя бы минимально достаточной точности определения реального состояния ОУ. Различные варианты экспертных оценок (в частности «ретроспективный вероятностный анализ» [21]) создают лишь иллюзию надежного обоснования, хотя при этом само решение имеет скорее интуитивный, чем научный характер.

В первую очередь такое положение свойственно многим исследованиям конструкций ОУ. Например, документы, определяющие стратегию стабилизации ОУ, фактически разрабатывались на основе экспертных заключений специалистов, что подкреплялось лишь расчетами некоторых фрагментов конструкций без должного учета их работы в составе всей структуры и геодезическими измерениями на внешней поверхности ОУ. По этой причине до сих пор фактически не выполнены мероприятия, необходимость осуществления которых отмечалась еще в акте комиссии по приемке на техническое обслуживание законсервированного 4-го энергоблока. Актуальными остаются требования реализации расчетов на прочность, устойчивость и несущую способность строительных конструкций по фактическому их выполнению и состоянию с целью установления конкретного срока службы.

Информационная слабость условий задач ОУ проявляется, прежде всего, при анализе «критических» зон, определяющих состояние всей системы. Отсутствие достаточно полных и надежных характеристик исключает возможность выработки обоснованных управляющих решений. При умелом манипулировании отрывистыми данными, исходя из политических или других установок, не имеющих отношения к науке, можно доказывать правильность выбора чуть ли не любого проекта, удовлетворяющего соображениям «здорового смысла».

8

Можно сделать вывод о том, что несовершенства указанных методов и средств их реализации, используемых в настоящее время в большинстве исследований ОУ, приводит к существенному снижению реального уровня опасностей ОУ, допускаемому в официальных

документах [18, 19, 21]. Эти обстоятельства заставляют искать более действенные методы предпроектного анализа и производственного решения доминанты ОУ [1 -8].

4. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫПОЛНЯЕМЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ Сложность проблемы ОУ и серьезные неудачи попыток их преодоления не означают безнадежность создания (в необходимые сроки при допустимых затратах!) эффективного научного обеспечения перевода ОУ в контролируемое состояние. Этот вывод основывается на опыте решения проблем различных типов ЭО, где определяющие результаты формировались при замене традиционных расчетов численным моделированием в сочетании с оценками рисков [9]. В атомной энергетике такая методология разработана для реакторов и может быть эффективно распространена на ОУ [7, 14, 15].

Анализ удачных проектов ЭО позволяет выделить ряд принципиальных особенностей исследований этого класса. На основе таких обобщений предложена методика комбинированных численно - модельных исследований, экспериментальных и проектноызыскательских работ [2, 5]. Она включает в себя ряд положений, универсальных для многих типов ЭО:

задача исследования ОУ рассматривается как задача системного многофакторного анализа ядерной, радиационной, экологической и общетехнической безопасности, которая определяется рисками нарушения защитных барьеров при деградационном или экстремальном изменении функций конструктивной структуры ОУ;

поведение ОУ описывается решением связанных задач нелинейной механики твердых деформируемых тел, термо-, аэро- и гидромеханики, газодинамики, теории расчета строительных конструкций, трубопроводов и сосудов высокого давления до стадии полного разрушения при представлении ОУ в виде пространственной динамической системы из элементов различной природы;

основным средством получения результатов является компьютерное моделирование, которое строится на основе рационального сочетания детерминистических и вероятностных подходов при минимальном применении экспертных оценок;

высокая точность моделирования при использовании сравнительно небольшого объема натуральных данных достигается в результате проблемно-ориентированной модернизации методов конечных элементов и разностей, численно-аналитического метода потенциала и средств их программной реализации.

Но такие подходы не могут улучшить исходную информацию о зонах, недоступных для прямых обследований. Для учета экстремальной индивидуальности ОУ предложена схема параметризации его поврежденной структуры как итог прохождения всех этапов разрушения и преобразований 4-го энергоблока от информативно достаточного исходного состояния [2]:

определение необходимых данных и разработка научно -технической документации осуществляется в результате динамического моделирования эволюции 4-го энергоблока в

9

ОУ на основе достоверных знаний о начальных условиях и некоторых зафиксированных промежуточных параметрах при верификации гипотез развития событий;

на первом этапе численно воспроизводятся основные гипотетические варианты развития переходных термомеханических процессов, вызвавших аварийное разрушение конструкций 4-го энергоблока;

сопоставление результатов вычислений с верификационными натурными данными позволяет обосновать адекватность моделей исследуемым процессам и оценить достоверность результатов определения итогового состояния конструкций, вошедших в структуру ОУ, а также топографии и состава фрагментов разрушенной активной зоны;

частично известная натурная информация дополняется полученными верификационными численными данными о состоянии элементов и узлов в труднодоступных областях ОУ;

разработанные модели, документация исполнительного типа, программно - технический комплекс и средства мониторинга применяются для достижения целей эксплуатации и преобразования ОУ.

5. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ [8]

Доаварийное состояние 4-го энергоблока и РБМК-1000 отражено в конструктивных и числовых моделях компьютерной базы данных. Документация исполнительного типа использована в программных комплексах для графического и аналитического представления объектов, которые трансформировались в систему ОУ. Построение графической части позволяет получить планы, разрезы, пространственные изображения экстерьеров и интерьеров (конструктивная структура, оборудование, инженерные сети и коммуникации и т.п.). Аналитическая часть содержит численные модели конструкций при различных вариантах технологических процессов и внешних условий в штатных и запроектных режимах. Нормативные (на период проектирования и в настоящее время) исходные события, нагрузки и воздействия сопоставлялись с конкретными статистическими данными. Модели блока и РБМК позволяют последовательно усложнять постановку задачи от регламентированных расчетов до исследования пространственной динамической системы, наиболее полно отражающей реальную работу объекта. Изучение процессов, имеющих эмпирическое описание, использовалось для оценки достоверности аналитического аппарата.

Моделирование запроектной аварии реактора 4-го энергоблока имеет две цели получения данных: о количестве, расположении и состоянии остатков активной зоны (АЗ) и о динамике нагрузок на конструкции блока. Рассматривались гипотетические этапы: термомеханическое разрушение технологических конструкций, паровое выталкивание крышки реактора, ее соударение с разгрузочно - загрузочной машиной, разбрасывание обломков АЗ, их рикошеты (в том числе, от летящей крышки), образование скоплений в центральном зале и других местах, расплавление остатков АЗ в реакторном пространстве и растекание лавы по нижним отметкам. Динамика давления определялась массой поступающего теплоносителя через оборванные каналы с учетом утечек через систему паросброса и отверстия, образовавшиеся при разрушении. Результаты показывают, что локальный разгон произошел в нижней части юго-восточной четверти АЗ. Энерговыделение определялось как функция от скоростей и зафиксированных расстояний отдельных фрагментов графитных блоков. Определяющими для оценок термомеханических вариантов поведения конструкций служили параметры их послеаварийного состояния.

10

Топография распределения и состава топлива практически совпадает для различных версий, поскольку при взрыве в штатном положении или при подъеме АЗ над шахтой разбрасывание фрагментов происходит в замкнутом пространстве одной динамической конфигурации. Выделены пять характерных типов (областей) разрушения АЗ от диспергирования по границам зерен до полного сохранения механической структуры. В скоплениях, включающих в себя неразрушенные элементы графитовых блоков и каналов (наиболее ядовитые формы остатков АЗ), содержится около 11 % топлива.

Моделирование разрушения конструктивной структуры 4-го энергоблока выполнялось при нагружении его силовыми, температурными, вибрационными и другими воздействиями, определенными в виде пространственно-временных функций в результате анализа аварии реактора. С целью минимизации погрешностей последовательно усложнялись модели и варьировались программные комплексы. Результаты расчетов конструкций, сохранившихся после рассмотренной стадии аварии, совместно с материалами натурных обследований и проектов составили основу для формирования базы данных ОУ, включающей в себя числовые модели его структуры и документацию исполнительного типа.

Верификация результатов осуществлялась при сравнении полученных численных данных с достоверной информацией об ОУ, которая фиксировалась в реперных узлах и вероятностно распространялась на другие компоненты системы. Об эффективности такого комбинированного подхода свидетельствует то, что группой исследователей НИИМБП в

результате целенаправленных визуальных обследований в 1993-1995 гг. было обнаружено несколько ранее неизвестных «критических зон» структуры ОУ. Они прогнозировались результатами моделирования, что позволило исследователям действовать оперативно с минимальной дозой нагрузки в высоких гамма-полях при натурном определении повреждений конструкций.

Моделирование существующего состояния ОУ выполнялось на основе методики, построенной на этапе анализа разрушения 4-го энергоблока при последовательном достижении нормативных предельных состояний и их развития до исчерпания функциональной способности конструкций. Исходные данные формировались для постулируемых состояний в виде стохастических воздействий на ОУ, представляемых дискретными аналогами конструктивной модели. Исследовались термомеханические пространственно-временные экстремальные и деградационные процессы. Они описывались детерминистически-вероятностными задачами при итерационном изменении структуры ОУ. Результатам придавался смысл обобщенной реакции в оценке рисков существования ОУ. Выявлены свойства структуры (в частности, ее высокая связанность - прочность «критических» узлов может определяться поведением достаточно удаленных от них фрагментов, а небольшие неравномерные осадки могут вызвать значительные усилия). Особенности системы практически исключают возможность анализа локальных зон без корректного учета их взаимодействия с другими элементами системы в комплексной постановке ядерной, радиационной, экологической и общетехнической безопасности ОУ.

Методика оценки рисков ОУ в развитие положений [14, 15] разработана как численно-модельный аппарат определения вероятностей возникновения и распространения экстремальных процессов с итоговой оценкой тяжести негативных последствий и

обоснованием управляющих решений по предупреждению, локализации и ликвидации механизмов аварий. Исходные события анализировались и отбирались для ОУ при статистической конкретизации физических и частотных характеристик в макронормативной базе данных [7, 8]. Оказалось, что большинство экстремальных параметров, стандартно задаваемых в соответствии с обобщениями инцидентов (например, падение летательного аппарата, взрывы внутри и вне объекта), значительно отличаются от реальных условий (анализ полетной обстановки и взрывного потенциала в зоне ОУ). На втором этапе обобщенная реакция ОУ определялась в результате моделирования развития постулируемых событий, что сопровождалось оценками полноты исходной информации и корректности полученных данных. Следующий этап состоял в анализе негативных последствий аварий ОУ. Ведущее событие (обрушение структуры ОУ) представлялось по основным сценариям экстремальных ситуаций. Уровень последствий определялся количеством и составом радионуклидов, выбрасываемых в окружающую среду, и процессами их водной и воздушной миграции. Применение достоверных моделей образования и переноса зараженного облака показывает, что оно может осесть за пределами 30-километровой зоны.

В результате установлено, что только выполнение полного объема исследований по оценке риска ОУ может завершиться выработкой обоснованных управляющих решений. Сокращение этапов (смягчение перечня исходных событий на основе частотных характеристик без выполнения остальных стадий, детерминистическое определение критериальных параметров без их вероятностных оценок) может привести к ложным выводам и рекомендациям, имеющим недопустимую цену ошибок. В первую очередь это заключение относится к учету тяжелых, но маловероятных, событий, во многом определяющих требования к стабилизации, извлечению топлива и другим технологиям ОУ.

Мониторинг состояния конструкций ОУ предлагается существенно развить на комплексной основе численного описания зон прогнозируемых разрушений (программотехнический комплекс) и фиксации характерных параметров в штатных и аварийных режимах (приборно - измерительный комплекс). Разрабатывается новый тип тензодатчика для условий большого перепада температур и высокого уровня излучений. Теоретические карты расположения топлива предлагается дополнить результатами радиотехнического зондирования пассивно-активной системой в подповерхностной толще скоплений

материалов в ОУ. Аналогичная аппаратура может быть разработана для дистанционного определения возгораний и развития пожаров, а также для создания физзащиты объектов.

Стабилизация ОУ рассматривается как комплекс мероприятий по снижению рисков существования и преобразования ОУ до введения в действие систем гарантирования безопасности. Выделяется ведущая задача уменьшения рисков обрушения конструкций ОУ. Ставится цель формирования, анализа и оптимизации технических и технологических вариантов стабилизации с учетом перспективы ОУ (обращение с радиоактивными материалами, монтаж и демонтаж конструкций и оборудования и т. п.).

Исходя из конкретных особенностей структуры ОУ, НИИ МБП уже в первых работах отказался от доминирующей идеи обеспечения краткосрочной стабилизации ОУ на основе усиления ненадежных узлов и перехода к долговременной стабилизации при объединении локальных решений [1,21]. Было показано, что местное усиление может иметь лишь

12

страховочное назначение при некоторых видах воздействий. При реализации экстремальных событий такие мероприятия оказываются практически бесполезными. Некоторые, казалось бы очевидные, локальные решения (например, сплошная заливка полости бетоном) могут даже ухудшить состояние структуры в целом. Поэтому выбор варианта устранения дефекта должен опираться на глубокую расчетную экспертизу развитой подсистемы стабилизации.

Разработан ряд технических предложений, глобально увеличивающих продольную и поперечную устойчивость сооружения. В них использованы различные конструктивные идеи от устройства капитальных структур до легких барьеров в виде быстровозводимых надувных или тонколистовых оболочек, выбор которых определяется, прежде всего, пенными и другими технологиями обращения с радиоактивными материалами. Варианты обладали определенными преимуществами, что нашло отражение в последующих разработках «Альянса», НИИСК, КИЭП и других организаций [20, 21]. Однако высокая стоимость реализации таких «глобальных» решений требует выполнения дополнительного техникоэкономического анализа последствий каждого этапа вмешательства в существующую структуру.

Оценка эффективности системы пылеподавления ОУ использована при разработке основного средства уменьшения негативных последствий обрушения покрытия или других нарушений оболочки ОУ. Решение сводилось к вероятностному моделированию процессов с учетом характеристик агрегатов пылеподавления и физики разлета и смачивания частиц при различных скоростях ветра.

Полученные результаты являются частью базы знаний (методик, моделей, программных и технических средств, регламентированной документации) для целенаправленного сопровождения эксплуатации, стабилизации и преобразований ОУ. Фрагменты этих материалов (методика термомеханического анализа действующих реакторных установок с оценкой ресурсов штатной эксплуатации и возможностей возникновения проектных и запроектных аварий, с выработкой рекомендаций по снижению риска) могут использоваться при продолжении работ и выводе из эксплуатации действующих энергоблоков Чернобыльской и других АЭС.

Актуальные направления научных исследований определяются необходимостью обеспечения практического решения проблем ОУ не только на инженерном уровне. Экстремальность ОУ требует совершенствования фундаментальных численных, экспериментальных и изыскательских подходов. Можно выделить необходимость разработки:

гибридных методов детерминистически-вероятностного моделирования, позволяющих увеличить суммарную эффективность аппарата исследований за счет преимуществ всех его компонентов в направлении минимизации требуемой натурной информации, сокращения объема вычислений и уменьшения стохастического разброса результатов вычислений при реализации переходных нелинейных динамических процессов механики разрушения композитных объектов;

модернизированной теории оценок рисков на основе современной математической базы;

программных средств, позволяющих реализовать индивидуализированные алгоритмы ОУ (моделирование процессов импульсного нагружения, обрушения фрагментов и итерационного изменения динамических моделей; восстановления геометрии по нерегламентированно выполненным фото и видеоматериалам и т. п.);

13

программно-технических и приборно-измерительных средств экспресс-анализа и физического моделирования ОУ в штатных и экстремальных ситуациях.

6. ВЫВОДЫ

1. Существующая научно-техническая база знаний о системе ОУ пока еще недостаточна даже для регламентированного анализа долговечности и безопасности ОУ; продолжение преимущественного применения дорогостоящих, но неэффективных методик (визуализация, малоинформативные измерения, расчеты и эксперименты, экспертные оценки), приведет к еще большему отставанию от динамики деструктивных процессов и к возрастанию со временем рисков нарушения защитных барьеров ОУ.

2. Научно-исследовательское и проектно-изыскательское направление [1 -8], разработанное на основе обобщения опыта решения проблем экстремальных объектов, позволяет принципиально повысить результативность изучения ОУ с целью его преобразования в экологически безопасную систему.

3. Индивидуализированным добавлением универсальным средствам исследований экстремальных объектов, может служить комплексная методика численного моделирования, оценок рисков и натурных обследований, определяющая состояние системы ОУ (в том числе, в труднодоступных зонах) с помощью анализа последовательности разрушения 4-го энергоблока и его преобразования в ОУ.

4. Выполненные работы подтверждают эффективность сформированного направления и возможность его реализации при допустимых затратах и в требуемые сроки для решения доминирующей задачи ОУ.

1. *Исследование состояния опорных конструкций балок* укрытия Б1, Б 2 в осях 47-51, Г-Л аварийного блока ЧАЭС // Отчет по НИР, НИИМБП по договору № 14/ Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Киев, 1993. - 2 кн. - 382 с.

2. *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, 1995. - 9 кн.

3. *Оценка эффективности работы аварийной системы пылеподавления объекта «Укрытие»* // Отчет по НИР, НИИМБП по договору № 34/95 от 30.06.95 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Киев, 1995. - 180 с.

4. *Современное состояние объекта «Укрытие» и окружающей его территории: (Отчет) / TACIS CONTRACT WW 92.04/01.01/B.029. - Чернобыль, 1995. - 215 с.*

5. *Исследование и численное моделирование надежности ответственных конструкций, грунтов и грунтовых вод основания объекта «Укрытие»* // Отчет по НИР, МНТЦ «Укрытие» по теме 1.1 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - № ГР. 0195U003875. - Чернобыль - Киев, 1995. - 14 кн.

6. *tabilisation of Ukritiye, Structural analysis on stabilisation concepts St 1.01-1.07 of Ukritiye - Description note, Appendix 5/26; Chernobyl feasibility study, Phase 3 Report. - TACIS Contract WW 92.04/01.01/B.029. 1995. - 191 p.*

6. *Отчет по безопасности (оценка риска) объекта «Укрытие реактора № 4 Чернобыльской АЭС»* // Отчет по НИР, МНТЦ «Укрытие» по ген. договору 1/95, тема 4. - Арх. № 3501. - Чернобыль - Киев, 1995. - 291 с.

7. *Исследование и численное моделирование ответственных конструкций и фунтов основания объекта «Укрытие»* // Отчет по НИР, НИИМБП / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Киев, 1996. - 10 кн.

9 *Veryuzsky V. 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.*

Ю. *Veryuzsky V. V., Gigrneishvily J. J. Design of Quickbuild Buildings and Constructions in Mountain Areas // The First International Design for Extreme Environments Assembly. University of Houston, p. D/C. 3.2.2, 1991.*

11. *Верюжский Ю. В. Численные методы потенциала в некоторых задачах прикладной механики. - Киев: Виша школа, 1978. - 184 с.*

14

12. *Верюжский Ю. В. Пакеты прикладных программ для прочностных исследований конструкций машин и сооружений ПОТЕНЦИАЛ (на рус., англ. и немец. языках). - Киев : Внешторгиздат, 1983.*

13. Верюжский Ю. В., Вусатюк А. П., Петренко А. Я., Савицкий В. В. Расчеты и испытания на прочность. Метод интегральных уравнений и программы расчета на ЭВМ плоских и пространственных элементов конструкций. Рекомендации. P50-54. - М.: Госстандарт СССР, ВНИИНМаш., 1988. - 154 с.
14. Швыряев Ю. В. и др. Вероятностный анализ безопасности атомных станций. Методика выполнения. - М.: ИЭА им. И. В. Курчатова, 1992. - 266 с.
15. 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.
16. Аугусти Г., Барата А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании. - М.: Стройиздат, 1988. - 584 с.
17. Чернобыльская катастрофа / Под ред. В. Г. Баряхтара. - Киев: Наук, думка, 1995. - 380 с.
18. Боровой А. А., Богатое С. А. и др. Состояние ядерной, радиационной и экологической безопасности объекта «Укрытие»: (Отчет) / ИВ ТЭМ РНЦ «Курчатовский институт» по этапу 1 договора № 19- МОС/95, № 130-09/38. - М., 1995. - 232 с.
19. Купный В. И. Объект «Укрытие»: вчера, сегодня, завтра (нынешнее состояние и перспективы Чернобыльского «САРКОФАГА»), Working Matenal International Forum: «One Decade after Chernobyl: Nuclear Safety Aspects». - Vienna: IAEA, April 1-3, 1996, pp. 227-248.
20. 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.
21. Прогнозирование долговечности укрытия над разрушенным четвертым энергоблоком Чернобыльской АЭС (строительная часть): Отчет НИИСК (НИР по договору № 877 от 01.10.94.) - Киев, 1995. - 168 с.
Получено 11.04.1996