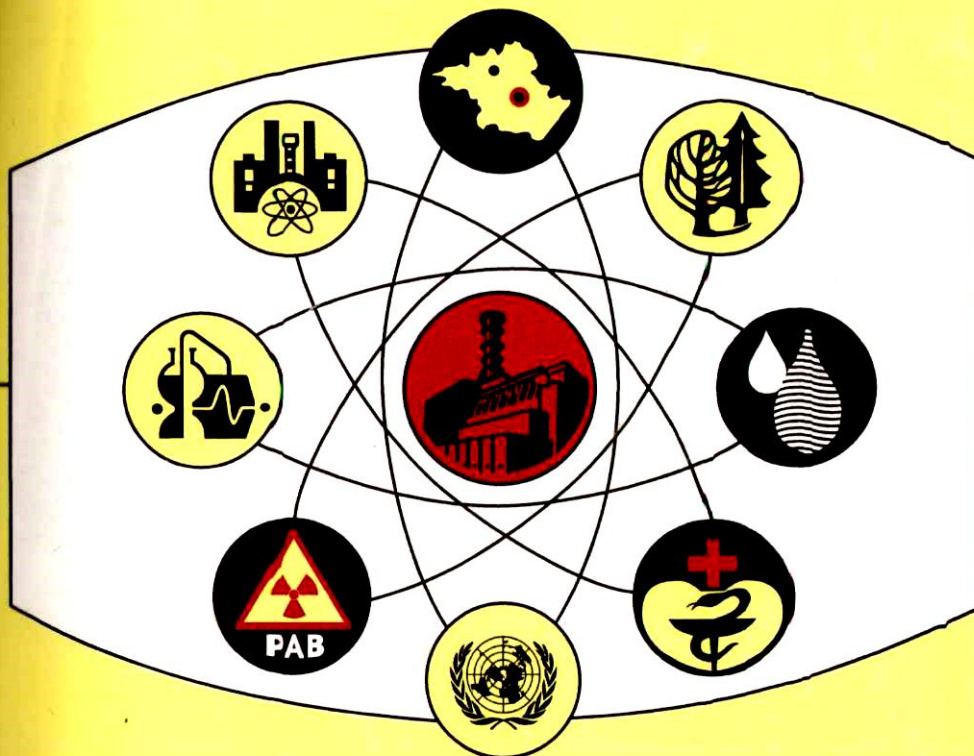


МІНІСТЕРСТВО УКРАЇНИ З ПИТАНЬ НАДЗВИЧАЙНИХ
СИТУАЦІЙ ТА У СПРАВАХ ЗАХИСТУ НАСЕЛЕННЯ ВІД
НАСЛІДКІВ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ КАТАСТРОФИ
АДМІНІСТРАЦІЯ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ І ЗОНИ БЕЗУМОВНОГО
(ОБОВ'ЯЗКОВОГО) ВІДСЕЛЕННЯ

THE MINISTRY OF UKRAINE OF EMERGENCIES AND AFFAIRS
OF POPULATION PROTECTION FROM THE CONSEQUENCES
OF CHERNOBYL CATASTROPHE
THE ADMINISTRATION OF THE EXCLUSION ZONE AND THE ZONE
OF ABSOLUTE RESETTLEMENT



ПРОБЛЕМИ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ

PROBLEMS OF CHERNOBYL EXCLUSION ZONE

6

поведінки системи та оцінка ризиків її негативного впливу на населення, персонал та навколишнє середовище будується на основі синтезу чисельного моделювання та натурного обстеження з урахуванням етапів запроектої аварії 4-го енергоблоку, формування та перетворення об'єкта «Укриття».

Для науковців, які працюють в галузі екології, радіології, атомної енергетики, будівництва, проектування об'єктів для екстремальних умов, прикладної математики та механіки, а також для аспірантів та студентів.

The collected papers include mostly results of works Research Institute for Mechanics of Quick - proceeding Processes united in a general research direction - creation of scientific and design support for converting the «Ukritiye» encasement into a controlled system, and solution other kinds of problems connected with elimination of the Chornobyl accident consequences. Complex means of analysis of the system behaviour and assesment of risk of negative influence upon people, personnel and environment is built on the basis of synthesis of numerical modeling and instrumental monitoring, with consideration of the 4th Unit core accident, formation and transformation of the «Ukritiye» encasement.

Intended for scientists and researchers in the field of ecology, radiology, nuclear power engineering, construction, extremal media design, applied mathematics and mechanics. May be useful to postgraduates and students.

Редакційна колегія

В.І.Холоша (відповідальний редактор), **О.В.Гребенюк** (заст. відповідального редактора), **Е.В.Соботович** (заст. відповідального редактора), **М.І.Проскура** (заст. відповідального редактора), **Н.О.Сирота** (відповідальний за випуск), **А.А.Єфімов** (відповідальний секретар), **В.І.Купний**, **В.Є.Тєпикін**, **В.І.Берчій**, **І.Ф.Вовк**, **О.В.Войцехович**, **В.Д.Вохмеков**, **В.А.Гайченко**, **В.В.Деревец**, **С.П.Джєно**, **Ю.П.Іванов**, **В.В.Жилінський**, **С.В.Казаков**, **В.О.Кашипаров**, **А.А.Лєдєньов**, **Б.С.Пристер**, **А.М.Сердюк**, **В.М.Стародумов**, **А.К.Сухоручкін**, **В.В.Токаревський**, **В.С.Давидчук**, **О.К.Авдєєв**, **О.Г.Сідлецький**, **І.П.Лось**

Адреса колегії

255620 Чорнобиль, вул. Радянська, 14

Адміністрація зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення

Тел. 225 30 58

8 293 5 11 52

*Затверджено до друку Науково-технічною радою
при Адміністрації зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення*

© Адміністрація зони відчуження і зони безумовного
(обов'язкового) відселення, 1998

ISBN 966-7649-02-4

МІНІСТЕРСТВО УКРАЇНИ З ПИТАНЬ
НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТА У СПРАВАХ ЗАХИСТУ НАСЕЛЕННЯ ВІД
НАСЛІДКІВ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ КАТАСТРОФИ
АДМІНІСТРАЦІЯ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ І ЗОНИ БЕЗУМОВНОГО
(ОБОВ'ЯЗКОВОГО) ВІДСЕЛЕННЯ

ПРОБЛЕМИ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ
PROBLEMS OF CHORNOBYL EXCLUSION ZONE

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК
ЗАСНОВАНО У 1994 Р.
Випуск 6

ЗМІСТ

Верюжский Ю. В. Исследование объекта «Укрытие» как представителя класса экстремальных объектов	1
Иващенко Б. П. Давление в реакторном пространстве и движение крышки реактора во время аварии 1986 г	15
Рубежанский Ю. И. Топография фрагментов активной зоны реактора, выброшенных в результате аварии на четвертом блоке ЧАЭС	21
Верюжский Ю. В., Синев П. А., Кошкин С. В., Саркисов В. В. Моделирование конструкций РБМК 1000 на стадии запроектной аварии	29
Ищенко Н. Г., Шимановский А. В., Сирота Н. А., Герасимова М. В. Численные модели 4-го энергоблока ЧАЭС для исследования поведения его конструкций в эксплуатационном, аварийном и поставарийном состояниях	44
Ищенко Н. Г., Анкянец К. И., Фиалко С. Ю., Скуратовский М. Н., Анкянец Н. Ю. Моделирование напряженно-деформированного состояния строительных конструкций 4-го энергоблока ЧАЭС при запроектной аварии	51
Верюжский Ю. В. Методы анализа безопасности объекта «Укрытие»	58
Бродовой В. Л., Иващенко Б. П. Построение и применение методики расчета показателей радиационной опасности объекта «Укрытие»	70

1

Шимановский А. В., Сиропчі Л. А., Герасимова М. В. Численное исследование опорных конструкций балок Б1, Б2 покрытия объекта «Укрытие» в осях 50-Ж	79
Андрощук Л. В., Иващенко Б. П., Никитин С. К. Анализ образования и движения пылевого облака в случае разрушения объекта «Укрытие»	85
Прусов В. А., Копейка О. В., Грымов Р. Ю. Гидродинамическая мезомасштабная модель распространения примеси от мгновенных и стационарных точечных источников выбросов	98
Андрощук Л. В., Иващенко Б. П., Никитин С. К., Свешников В. Н. Оценка эффективности аварийной системы пылеподавления объекта «Укрытие»	106
Верюжский Ю. В., Синев П. А., Алексеев И. В., Бродовой В. Л., Гаврилов Г. В. Программно-технический комплекс и база данных исследования объекта «Укрытие»	111
Верюжский Ю. В., Бурлаков В. М., Гажиенко В. В., Заруднев И. И., Соколов Г. Е. Принцип действия, информационные возможности и состояние разработки радиолокационных систем дистанционного контроля в интересах обеспечения безопасности объекта «Укрытие» и Чернобыльской зоны	122
Скуратовский М. Н., Ищенко Н. Г., Бродовой В. Л. Динамика износа и ремонтов жилого фонда г. Припять с учетом перспективы его использования	130
Пинчук В. Я., Довгий С. А., Калинин В. М., Копейка О. В. Организационно-техническая система «Информ-Чернобыль»	141
Пинчук В. Я., Калинин В. М., Ежов С. А. Анализ перспектив развития и вопросы построения систем поддержки принятия решений в управленческой сфере	149
Гришин В. В., Берлизов А. Н., Коваль Г. Н., Третьяков А. А. Оценка дозовых полей при обращении с радиоактивными отходами на первой очереди производств комплекса «Вектор»	155
Рецензия на сборник «От теории к практике: Психологические основы культуры безопасности атомной энергетики и промышленности». Под редакцией Г. Е. Журавлева. Москва: Изд. ЦЭМИ РАН, 1997, 274 с	171

2

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-изыскательских 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 механизмов. Сложность проблемы требует привлечения наукоемких методов, в которых бы сочеталась фундаментальность подходов с учетом уникальности каждого типа ЭО.

Общая теория различных ЭО строится на основе изучения особенностей, характерных для всего класса. Так, поврежденная атомная подводная лодка или космический аппарат

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 безопасности [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 ИССЛЕДОВАНИЙ 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 повреждений 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 ядерноопасных 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 замонаризации 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 нормативно-технической 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 «здравого 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 проектно-изыскательских 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 деградиционном 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 натурных 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. Энерговыведение 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 ядерноопасные 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 вероятно 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 нагрузкой 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, представляемом 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

11

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 (программно-технический 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 технико-экономического 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 к 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, Б2 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. *Stabilisation 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.

7. *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.

8. *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.

10. *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: Вища 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. И., 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. Р50-54. - 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. Аугустин Г., Барата А., Кашишати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании. - М.: Стройиздат, 1988. - 584 с.
17. Чернобыльская катастрофа / Под ред. В. Г. Барьяхтара. - 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

УДК 621.039.587

Б. П. Иващенко

ДАВЛЕНИЕ В РЕАКТОРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ И ДВИЖЕНИЕ КРЫШКИ РЕАКТОРА ВО ВРЕМЯ АВАРИИ 1986 Г.

Проанализированы процессы, происходившие на начальной стадии аварии 1986 г. Основное внимание уделено динамике изменения давления в реакторном пространстве при учете поступления теплоносителя в активную зону через оборванные технологические каналы и одновременном выходе паровоздушной смеси через штатную систему паросброса и образовавшиеся неплотности защитной оболочки. На этой основе изучено движение крышки реактора, при этом учитывается взаимодействие поднимающейся крышки с разгрузочно-загрузочной машиной. Определено давление газа в реакторном пространстве и на этой основе рассчитано давление на стены и перекрытия помещений барабан-сепараторов и центрального зала, имевших место после выбрасывания крышки и выхода паровоздушной смеси из шахты реактора в соседние помещения.

В данной работе предпринята попытка описать явления, сопутствующие аварии 1986 г., на основании информации, имеющейся о ее последствиях. Приведена предположительная схема протекания процессов в реакторе: в результате некоторой аварийной ситуации, например, нарушения герметичности технологических каналов, внутрь корпуса реактора начал поступать теплоноситель, который в результате контакта с разогретыми до высокой температуры деталями конструкции образовал внутри корпуса реактора воздушно-паровую смесь, сжатую до некоторого давления. Определенное время крышка оставалась

© Б. П. Иващенко, 1998

15

в покое, поскольку, во-первых, ее отрыву препятствовал собственный вес, а, во-вторых, через крышку проходят различные трубы, коммуникации и другие конструктивные элементы, удерживающие ее. Наконец, при некотором критическом значении давления наступает обрыв этих связей, после чего крышка приходит в движение под действием сил давления сжатой воздушно-паровой смеси, поступающей в активную зону через оборванные технологические каналы. В данной работе не акцентируется внимание на причинах, инициировавших этот процесс, а основное внимание уделяется анализу процесса разгона и выбрасывания вверх крышки реактора в тот период времени, когда через оборванные технологические каналы осуществлялось массовое поступление теплоносителя в активную зону.

Прежде всего отметим, что кожух реактора (согласно монтажной терминологии схема КЖ) разрушается при избыточном внутреннем давлении порядка 5 атм., а металлоконструкции боковых баков биологической защиты (схема Л) способны выдержать

давление порядка 20 атм. [1]. Поскольку металлоконструкции схемы Л остались целы после аварии, следует сделать вывод, что во время начальной стадии аварии давление в реакторном пространстве не поднималось выше этой отметки.

Крышка реактора (схема Е) окружена по периметру металлоконструкциями схемы Д, так что при движении вверх схемы Е до высоты, не превышающей собственной толщины, (приблизительно 3 м), зазор между схемами Е и Д остается постоянным и равным своему первоначальному значению примерно 7,5 см.

С учетом изложенных замечаний попытаемся промоделировать процесс разгона и метания крышки реактора. Масса пара t в реакторном пространстве изменяется во времени в соответствии с уравнением [2]

$$dm/dt = G_n - G_o, \quad (1)$$

где G_n , G_o , - массовые расходы поступающего и отводимого пара. Масса пара связана с его плотностью соотношением

$$\rho = m/V \quad (2)$$

где V - объем свободного пространства, доступного для распространения пара. До разрыва кожуха реактора этот объем $V=500 \text{ м}^3$, при разрыве кожуха он увеличивается до $V_0=950 \text{ м}^3$. При движении крышки вверх объем зависит от перемещения крышки x :

$$V = V_0 + xS_D, \quad (3)$$

где S_D - площадь круга с радиусом, равным радиусу внутреннего диаметра схемы Д.

Если обозначить S_k - площадь крышки реактора (примерно 245 м^2), а давление в пространстве под крышкой p , то сила, выталкивающая вверх крышку и часть активной зоны, равна $F = pS_k$. Если масса выталкиваемой системы M , то уравнение движения крышки при ее разгоне

$$Md^2x/dt^2 - pS_k - Mg, \quad (4)$$

где g - ускорение силы тяжести.

Плотность пара связана с давлением соотношением, вытекающим из уравнения состояния [3],

$$p = \rho RT, \quad (5)$$

где T - температура, R - газовая постоянная, для паров воды $R=462,457 \text{ м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{град})$.

16

Чтобы замкнуть приведенные уравнения, необходимо определить входящие в уравнение (1) значения массовых расходов G_n и G_o .

Пар из пространства под схемой Е может выходить, во-первых, через штатные системы паросброса (их площадь обозначим S_1), и, во-вторых, через щели, прежде всего через зазор между схемами Е и Д (площадь этой щели $S_2=4,17 \text{ м}^2$). Известно [4], что при истечении газов в случае, когда отношение давлений в объеме-источнике и объеме-приемнике превосходит два, устанавливается истечение с местной скоростью звука. Массовый расход, который при этом устанавливается, называется критическим расходом. Будем определять расход отводимого пара по формуле критического расхода [4]:

$$G_o = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{1/(\gamma-1)}} \frac{p}{\sqrt{RT}} (S_1 + S_2), \quad (6)$$

где p , T - давление и температура в объеме-источнике.

В случае разрыва технологических каналов вода или пар могут поступать в активную зону либо снизу, через трубопроводы, идущие от ГЦН, либо сверху, через трубопроводы к барабанам-сепараторам. Известно, что при номинальном режиме работы массовый расход теплоносителя через один ТК составляет примерно 7-8 кг/с [5]. Произведем расчет поступающего в АЗ теплоносителя, основываясь на результатах статьи [2], посвященной динамике роста давления в реакторном пространстве в случае обрыва технологических каналов. В этой работе приведен график изменения давления в реакторном пространстве в случае обрыва десяти технологических каналов [2, стр. 255, рис. 3]. По углу наклона приведенной кривой (увеличение давления на 0,3 МПа за время 3 с), учитывая, что свободный для распространения пара объем внутри металлоконструкции КЖ составляет

примерно 500 м^3 , можно определить массовый расход поступающего пара через один оборванный технологический канал $G_n=19,32 \text{ кг/с}$.

Аналогично по графику [2, стр. 254] может быть оценена упоминавшаяся выше величина S_1 , т. е. эффективная площадь штатной системы паросброса из реакторного пространства, и она составляет $0,03 \text{ м}^2$.

Уравнения (1)-(6) можно проинтегрировать методом Рунге-Кутты. При этом естественно считать, что разгон крышки продолжается до тех пор, пока она не вылетит из металлоконструкции схемы Д, которая в данном случае играет роль ствола орудия, выбивающего крышку.

Очевидно, что при движении крышки вверх трубопроводы, связывающие верх крышки с барабанами-сепараторами, некоторое время будут деформироваться, но еще функционировать, однако по достижении некоторого критического расстояния они оборвутся и после этого теплоноситель от барабанов-сепараторов поступать через них уже не будет. При интегрировании уравнений полагалось, что эти трубопроводы начинают обрываться при поднятии крышки на 1 м и оборвутся по достижении высоты 2 м.

Результаты решения задачи представлены на рис. 1, 2. Здесь приведены зависимость от времени соответственно давления в пространстве между схемами Е и ОР и перемещения крышки вверх. Как видно из рис. 1,2, продолжительность разгона крышки составляет примерно 0,5 с. Крышка при этом разгоняется до скорости $18,9 \text{ м/с}$. Как следует из графика на рис. 1, давление при движении крышки сначала увеличивается, а затем, в результате совместного действия трех факторов: увеличения объема пространства между схемами Е и ОР с поднятием крышки, утечки пара через щели и обрыва труб

17

между барабаном-сепаратором и крышкой, начинает уменьшаться. Максимальное давление составляет примерно 16 атм.. Точка, в которой наблюдается резкое изменение давления, соответствует моменту разрыва кожуха реактора.

Известно, что после аварии часть скафандра разгрузочно-загрузочной машины (РЗМ) была обнаружена на отметке 46 м, причем она пробила перекрытие на этой отметке между осями 49 и 50 и частично пробила расположенное ниже перекрытие на отметке 43 м [6, чертеж разреза 7-7]. На основе этой информации попытаемся оценить ту начальную скорость, которую приобрела крышка реактора в результате начального воздействия.

Составим уравнения, описывающие взаимодействие машины РЗМ с крышкой реактора в процессе разгона последней импульсом сил, действующих со стороны реакторного пространства.

Пусть M - масса как самой крышки, так и части активной зоны, выкидываемой вверх вместе с ней. Пусть J - момент инерции этой системы относительно центра тяжести, u - скорость центра тяжести системы после соударения, v - скорость РЗМ после удара, ω - угловая скорость крышки после удара, R - радиус крышки, l - расстояние в плане от центра крышки до точки, где была расположена РЗМ; m - масса РЗМ.

Масса скафандра РЗМ составляет 200 т, а масса тележки и моста - приблизительно 160 т, поэтому значение m принимаем равным 360 т [5].

Уравнение количества движения системы с проекции на вертикальную ось приводит к соотношению

$$Q = Mu + mv, \quad (7)$$

где Q - общее количество движения в вертикальном направлении, полученное системой за время разгона.

Уравнение сохранения момента количества движения относительно центра тяжести крышки реактора имеет вид

$$0 = J\omega - vml, \quad (8)$$

Приравнявая в конце процесса соударения скорости как РЗМ, так и той точки крышки, которая с ней соударялась, получаем

$$v = u - l\omega. \quad (9)$$

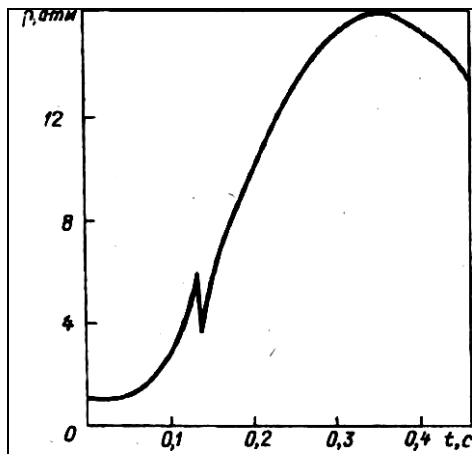


Рис. 1. Зависимость давления в реакторном пространстве от времени

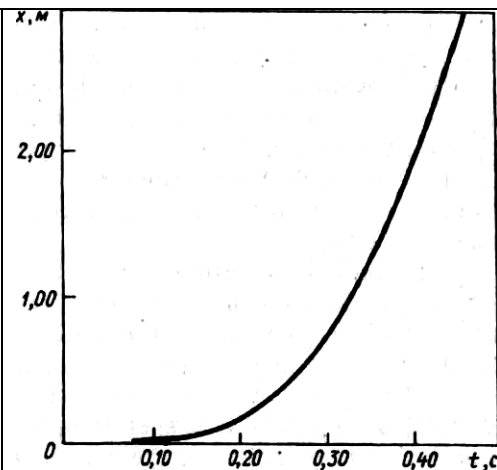


Рис. 2. Зависимость перемещения крышки реактора от времени

Из приведенных соотношений вытекает

$$v = Q \cdot \frac{1}{1 + \frac{ml^2}{J}}. \quad (10)$$

18

Оценивая приблизительно значение момента инерции крышки по формуле для круглого диска [7], расстояние $l=R$, массу крышки принимаем примерно равной 2500 т, массу выбрасываемой части активной зоны - 1500 т, находим момент инерции собственно крышки относительно своего центра тяжести $J_1=97350 \text{ т} \cdot \text{м}^2$, а части АЗ относительно своего центра тяжести $J_2=36750 \text{ т} \cdot \text{м}^2$, соответственно момент инерции $J=149100 \text{ т} \cdot \text{м}^2$. Отсюда находим, что скорости крышки и машины РЗМ связаны соотношением

$$u=v \cdot 1,188, \quad (11)$$

$$v=u \cdot 0,842. \quad (12)$$

Как отмечалось выше, скафандр РЗМ поднялся на высоту приблизительно 14 м, что соответствует его начальной скорости примерно $v=16,5 \text{ м/с}$. Отсюда на основании формул (11) и (7) можно найти значения v и Q и получить оценку средней скорости выбрасываемой вверх массы $w=Q/(M+m)=18,67 \text{ м/с}$. Эта оценка скорости хорошо согласуется с приведенной выше оценкой $w=18,9 \text{ м/с}$, опирающейся на анализ давления в реакторном пространстве. Заметим также, что в результате удара по РЗМ крышка начинает вращательное движение. Из уравнения (8) определяем, что при указанных выше параметрах задачи угловая скорость крышки после соударения составляет $\omega=0,35 \text{ с}^{-1}$.

Таким образом, из приведенной выше схемы следует что:

металлоконструкции схемы Л остались целы, в то время как действовавшее внутри активной зоны воздействие оказалось достаточно интенсивным, чтобы выбросить вверх значительную массу в виде самой крышки и части активной зоны;

скафандр РЗМ поднялся до отметки 46 м между осями 49 и 50 и пробил перекрытие, расположенное на этой отметке;

в шахте реактора обнаружены значительные по площади куски стен, отделявшие помещения барабанов-сепараторов от центрального зала [10]. Этот факт согласуется с тем, что в процессе полета крышки вверх трубопроводы, соединяющие активную зону с барабанами-сепараторами, прежде чем оборваться, будучи натянутыми поднимающейся крышкой, создадут воздействие на край технологического проема для прокладки труб в упомянутых стенах на отметке примерно 34 м, причем направление этих усилий таково, что они стремятся вырвать кусок стены В сторону шахты реактора.

Приведенное выше значение давления 16 атм. в шахте реактора можно считать начальным приближением к истинному значению и на его основе попытаться смоделировать ту часть силового воздействия на стены и перекрытия центрального зала и помещений барабанов-сепараторов, которая обусловлена поступлением сжатого пара из шахты реактора

в указанные помещения в тот промежуток времени, когда крышка реактора была выброшена вверх.

Эта задача рассматривалась с помощью конечноразностного метода аэродинамики на основе подхода Мак-Кормака, опирающегося на описание движения идеального газа с помощью уравнения неразрывности, уравнений движения, уравнения энергии и уравнения состояния. Более подробное описание подхода изложено в [11].

19

На рис. 3 приведен график распределения давлений в некоторый момент времени развития процесса истечения воздушно-паровой смеси из шахты реактора в центральный зал и помещения барабанов-сепараторов. Задача рассматривается в плоской постановке, а левая вертикальная граница расчетной области соответствует плоскости симметрии. Нижняя часть рисунков моделирует шахту реактора, верхняя - центральный зал, а правая - помещение барабана-сепаратора. В середине центрального зала приведена схема Е, ее присутствие учитывалось на основании того, что в соответствии с изложенным выше ее подъем на высоту порядка 14 м и назад занимает несколько секунд, в то время как процесс истечения сжатого пара из шахты реактора - несколько десятых долей секунды, и поэтому в течение всего процесса истечения она являлась препятствием для потоков газа. В начальный момент времени в шахте реактора давление составляет 16 атм., а в остальных помещениях - 1 атм. Отсюда видно, что на строительные конструкции действует переменное во времени и по пространству давление, причем для данного конкретного варианта на стены центрального зала и помещений барабанов-сепараторов действовали давления порядка 1-3,5 атм. Следует отметить, что динамика распространения давления по помещениям такова, что в отдельные моменты времени (в частности и для приведенного на рис. 3) главный вектор сил давления на стену между барабанами-сепараторами и центральным залом направлен в сторону центрального зала.

Приведенные здесь результаты не носят окончательный характер, и их уточнение возможно на основе, во-первых, уточнения величины расхода поступавшего тара; во-вторых, учета порядка разрушения стен и перекрытий, поскольку открывающиеся места для выхода пара изменяют дальнейшее решение аэродинамической задачи. Кроме того, на строительные конструкции, кроме сил давления воздушно-паровой смеси, могла действовать и ударная волна от возможного второго взрыва [8, 9], который в настоящей работе не рассматривался.

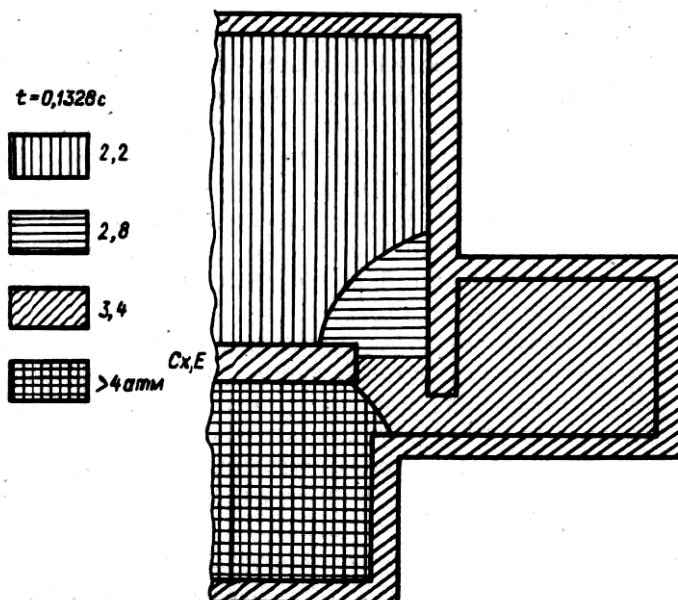


Рис. 3. Давление на стены центрального зала и помещений барабанов-сепараторов

20

1. *Исследование и численное моделирование надежности ответственных конструкций, грунтов и грунтовых вод основания объекта «Укрытие»* // Отчет по НИР, МНТЦ «Укрытие» по теме 1.1. - Кн. 4.: Начальная стадия аварии Чернобыльской АЭС. Расчет металлоконструкций и технологического оборудования реактора на эксплуатационные и предельные аварийные нагрузки. - № ГР 195U003875. - Чернобыль - Киев, 1995.- 380 с.

2. *Габараев Б. А., Миронов Ю. В., Новосельский О. Ю. и др.* Динамика давления в реакторном пространстве РБМК // Атомная энергия. 1990. - 69. - Вып. 4. - С. 253-255.
3. *Лоицянский Л. Г.* Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1973. - 694 с.
4. *Седов Л. И.* Механика сплошной среды. Т. 2. - М.: Наука, 1973. - 584 с.
5. *Техническое описание остановок, оборудования и систем I очереди Чернобыльской АЭС - ПО ЧАЭС:* 1988. - 141 с.
6. *Подкомплект рабочих чертежей 1318-17-70...* Главный корпус. Аппаратное отделение. Блок «Б». Стены с отм. 6.00 до отм. 12.00 в осях 49-51. Гидропроект. Ленинград, 1978.
7. *Кильчевский Н. А.* Курс теоретической механики. Т. 2. - Киев : Вища школа, 1975. - 438 с.
8. *Хронология* процесса развития последствий аварии на 4-м блоке ЧАЭС и действия персонала по их ликвидации // Отчет по НИР, МНТЦ «Укрытие» (1-й этап) по х/д № 100/89. - Чернобыль-Киев. - 1990. - 167 с.
9. *Эдвард Э. Пурвис III и МНТЦ «Укрытие».* Сценарий Чернобыльской аварии по состоянию на апрель 1995 г. // НАН Украины, МНТЦ «Укрытие», Чернобыль. - 1995. - 147 с.
10. *Пазухин Э. М.* Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования. - Радиохимия. - 1994 - 36. - № 2. - С. 97-142.
11. *Андрущук Л. В.* Динамическое взаимодействие осесимметричных упругих тел с газовым потоком // Рукопись деп. в ГНТБ Украины 25.07.95, № 1853-Ук95.

Получено 11.04.96

УДК 621.039.5

Ю. И. Рубежанский

ТОПОГРАФИЯ ФРАГМЕНТОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА, ВЫБРОШЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ НА ЧЕТВЕРТОМ БЛОКЕ ЧАЭС

Разработана методика определения топографии обломков активной зоны реактора, выброшенных взрывом в результате аварии на Чернобыльской АЭС. В результате серии численных экспериментов построены области разрушения и выброса активной зоны реактора. Исследовано движение обломков активной зоны в поле сил тяжести. Построена топография выброшенных фрагментов для случая взрыва активной зоны в штатном положении и ее взрыва над настилом реакторного отделения.

В результате аварии на четвертом блоке ЧАЭС часть активной зоны реактора - графит, фрагменты топливных каналов и тепловыделяющих сборок - были выброшены на кровлю машзала, блока В, третьего блока, разбросаны по прилегающей территории. Некоторая часть обломков активной зоны находится в завалах центрального зала реакторного отделения. Часть обломков в результате проведения работ по дезактивации были вывезены и захоронены. Значительное количество обломков было сброшено в центральный зал с прилегающих крыш.

В связи с проведением работ по оценке степени ядерной безопасности уточнение мест расположения и количества реакторного топлива в различных внутренних помещениях объекта «Укрытие» еще не утратили своей актуальности. Кроме того, постоянное разрушение топливосодержащих масс, образование топливной пыли, ее дальнейшее

© Ю. И. Рубежанский, 1998

21

превращение в мелкодисперсную фракцию с последующей миграцией и возможностью накопления в некоторых помещениях объекта привлекает к проблеме расположения топлива повышенное внимание.

С помощью теплотрического и визуального методов разведки [1, 2], проведенных оценок по балансу цезия и магния в лавообразных топливосодержащих массах [2], была получена достаточно полная информация о расположении и количестве топлива в нижних помещениях реакторного отделения. Что касается верхних этажей, то здесь оценки не столь достоверны.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы на основе численного моделирования аварийного процесса попытаться указать первоначальное расположение фрагментов активной зоны выброшенных из шахты реактора в результате аварии.

Конечно, картина расположения фрагментов в дальнейшем менялась в связи с горением, засыпкой аварийного блока с вертолетов, проведением работ по дезактивации и

строительству объекта «Укрытие», однако первоначальное расположение топлива, интегральная оценка его количества, представляет собой определенный интерес.

Предлагаемая методика не претендует на полноту и не охватывает все аспекты протекания аварии на ЧАЭС, она носит приближенный, оценочный характер. Это попытка на основе известных в настоящее время фактов прояснить некоторые детали аварии, исходя из анализа кинетики разрушенных фрагментов активной зоны. К приведенным результатам необходимо относиться достаточно осторожно, как к первому приближению, которое в последующем подлежит уточнению и переосмысливанию с учетом новых фактов и дальнейшей разработки теории.

Предлагаемый подход позволяет, анализируя топографию выброшенных фрагментов активной зоны, оценить достоверность исходных сценариев протекания аварии, определить нагрузки на металлические и строительные конструкции четвертого энергоблока в процессе протекания аварии, построить эволюционную картину разрушения конструкций. Оценить степень этого разрушения. Предлагаемая методика предусматривает учет взаимодействия летящих фрагментов активной зоны с движущейся верхней плитой биологической защиты (схема Е).

1. Численное моделирование процесса разрушения активной зоны реактора.

Процесс разрушения активной зоны реактора условно можно разделить на три этапа.

На первом этапе происходит передача энергии аварийного разгона реактора элементам конструкции активной зоны. Предполагается, что возникающие при этом давления настолько велики, что можно пренебречь прочностными, пластическими свойствами среды и силами трения по сравнению с инерциальными силами. Таким образом, получается модель идеальной жидкости. При этом также будем пренебрегать сжимаемостью, так что энергия передается среде мгновенно.

На втором этапе происходит разрушение активной зоны. При высоких скоростях нагружения, которые были свойственны аварии, тангенциальные напряжения не успевают релаксировать. Поэтому характер разрушения существенно не отличается от разрушения хрупких материалов.

На третьем этапе происходит движение обломков активной зоны в поле сил тяжести. Здесь используется модель идеальной несжимаемой сыпучей условно твердой среды. Рассчитывались траектории движения разрушенных частей активной зоны и места их падения с учетом возможного отражения от стен.

22

Первый этап. Используется импульсная постановка задачи [3]. Ее суть состоит в следующем. Так как взрывные нагрузки кратковременны и имеют достаточно большие абсолютные величины, то можно считать, что они действуют в бесконечно малом промежутке времени от 0 до τ , а давление p в этом промежутке настолько велико, что импульс давления Π остается конечным. В этом случае вектор скорости $V(x, t)$ и давление $p(x, t)$ в среде, движущейся под действием импульса давления Π , в момент времени окончания действия импульса $t = \tau$, в поле сил тяжести определяется по формулам

$$V(x, \tau) = \text{grad } \varphi, \quad x \in \Omega.$$

$$p(x, \tau) = \frac{\Pi}{\tau} + p_0 - \rho \left[\frac{\varphi}{\tau} + \frac{1}{2} |\text{grad } \varphi|^2 + gz \right],$$

где ρ - плотность, g - ускорение силы тяжести, ось Oz направлена вертикально вверх. Потенциал скоростей φ является решением уравнения

$$\nabla^2 \varphi = 0, \tag{1}$$

удовлетворяющего следующим условиям:

на неподвижной границе $\Gamma^{(1)}$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{\Gamma^{(1)}} = 0, \tag{2}$$

на подвижной границе $\Gamma^{(2)}$

$$\left[\frac{\partial G}{\partial t} + (\text{grad } \varphi, \text{grad } G) \right]_{\Gamma^{(2)}} = 0, \tag{3}$$

на свободной границе $\Gamma^{(3)}$

$$\Phi|_{\Gamma^{(3)}} = 0, \quad (4)$$

на части границы $\Gamma^{(4)}$, находящейся под действием импульсной нагрузки,

$$\Phi|_{\Gamma^{(4)}} = -\frac{1}{\rho} \Pi. \quad (5)$$

Предполагается, что в начальный момент времени $t=0$ среда находилась в состоянии покоя

$$\varphi(x, 0)=0 \quad \nabla x \in \Omega. \quad (6)$$

Здесь $G(x, t)=0$ - уравнение, описывающее подвижную твердую границу, моделирует движение верхней плиты биологической защиты реактора (схема Е). Предполагается, что G - заданная функция.

Второй этап. Построение области выброса АЗ реактора. В рамках рассматриваемой модели М. А. Лаврентьевым [4] была предложена твердожидкостная модель, согласно которой среду, находящуюся под действием импульсного нагружения, следует считать идеальной несжимаемой жидкостью не во всей области, занятой средой, а лишь в некоторой ее части, расположенной вблизи поверхности нагружения. На больших же расстояниях среда в движение не приходит, поэтому ее можно считать абсолютно твердым телом. Исходя из этого было предложено отыскивать границу области разрушения как линию, вдоль которой скорость движения среды $V-V^*$, где V^* - критическая скорость.

23

В работе [5] указан способ определения V^* . Считается, что разрушение происходит тогда, когда удельная кинетическая энергия частиц среды $e=pV^2/2$ превышает удельную энергию $e^*=\sigma^*/2E$, необходимую для разрушения. Здесь σ^* - предел прочности, E - модуль Юнга. Тогда из условия $e=e^*$ можно найти величину критической скорости

$$V_* = \frac{\sigma_*}{\sqrt{\rho E}}.$$

Определим область Ω_0 активной зоны, которая под действием импульсного нагружения разрушается и приходит в движение следующим образом:

$$\Omega_0 = \{x \in \Omega \mid V(x, \tau) > V_*\}. \quad (7)$$

Границу области Ω_0 обозначим Γ_0 . В общем случае

$$\Gamma_0 = \Gamma_0^{(1)} + \Gamma_0^{(2)} + \Gamma_0^{(3)} + \Gamma_0^{(4)}. \quad (8)$$

Здесь $\Gamma_0^{(1)}$ - неподвижная твердая граница, форма которой задана и остается неизменной все время движения обломков, $\Gamma_0^{(1)} \subset \Gamma^{(1)}$. На $\Gamma_0^{(1)}$ выполняется граничное условие (2). $\Gamma_0^{(2)}$ - твердая подвижная граница (граничное условие (3)). $\Gamma_0^{(3)}$ - свободная поверхность, на которой выполняется граничное условие (4). И, наконец,

$$\Gamma_0^{(4)} = \{x \in \Omega \mid V(x, \tau) = V_*\}.$$

Оставаясь в рамках рассматриваемой модели, можно считать $\Gamma_0^{(4)}$ твердой неподвижной границей и задавать на ней краевое условие вида (2).

Третий этап. Движение обломков активной зоны реактора в поле сил тяжести. В начальный момент времени, скажем, $t=0$, задана пространственная область Ω_0 вида (7) с границей Γ_0 (8), занятая разрушенной средой, и из решения задачи (1)-(5) найдено распределение потенциала скоростей $\varphi_0(x)$. Требуется определить дальнейшее движение среды. Другими словами, для каждого $t>0$ необходимо найти область Ω_t с границей Γ_t и функцию $\varphi_0(x, t)$, гармоническую по x в этой области, удовлетворяющую на Γ_t соответствующим граничным условиям.

За малый отрезок времени δt каждая точка границы Γ_0 области Ω_0 сдвинется в направлении $\text{grad } \varphi_0$ на расстояние $|\text{grad } \varphi_0| \delta t$. Таким образом, получается новая поверхность

$$\Gamma_{\delta t} = \Gamma_{\delta t}^{(1)} + \Gamma_{\delta t}^{(2)} + \Gamma_{\delta t}^{(3)},$$

в общем случае имеющая вид

$$\Gamma_{\delta t} = \Gamma_0 + \text{grad } \varphi_0|_{\Gamma_0} \delta t,$$

где, как и прежде, $\Gamma_{\delta t}^{(1)}$, $\Gamma_{\delta t}^{(2)}$ - твердая неподвижная и подвижная границы, $\Gamma_{\delta t}^{(3)}$ - свободная граница области $\Omega_{\delta t}$. Условие постоянства давления на свободной границе можно записать в виде

$$\frac{\partial \varphi_0}{\partial e} + \frac{1}{2} |\text{grad } \varphi_0|^2 = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\Pi}{\tau} - p_0 - \rho g \zeta \right] \delta t \quad \text{на } \Gamma_{\delta t}^{(3)},$$

где ζ - высота в точке x на границе $\Gamma_{\delta t}^{(3)}$ над некоторой горизонтальной плоскостью. Заметим, что части границы $\Gamma_{\delta t}^{(1)}$, $\Gamma_{\delta t}^{(2)}$, $\Gamma_{\delta t}^{(3)}$ могут быть многосвязанными. Кроме того, область $\Omega_{\delta t}$, по сравнению с Ω_0 может изменить свою связность.

В момент времени δt потенциал φ на $\Gamma_{\delta t}^{(3)}$ имеет вид

$$\varphi(x, \delta t) = \varphi_0(x) + \left[\frac{1}{\rho} \left(\frac{\Pi}{\tau} - p_0 \right) - g \zeta - \frac{1}{2} |\text{grad } \varphi_0|^2 \right] \delta t. \quad (9)$$

Далее, для области $\Omega_{\delta t}$ с границей $\Gamma_{\delta t}$ решая задачу (1) с граничными условиями (2),

(3) и на $\Gamma_{\delta t}^{(3)}$ новыми граничными условиями $\varphi(x)|_{\Gamma_{\delta t}^{(3)}} = f(x, \delta t)$, где $f(x, \delta t)$ - функция, определяемая правой частью соотношения (9), находим значение потенциала скоростей $\varphi(x, \delta t)$ для новой области $\Omega_{\delta t}$. Продолжая описанный процесс, можно построить область Ω_t , вычислить потенциал φ в любой произвольный момент времени t и затем найти скорости и давление для всех $x \in \Omega_t$. Движение среды отслеживается до тех пор, пока она сохраняет свою сплошность, т. е. пока вектор нормального напряжения на любой площадке отрицателен. Далее движение обломков активной зоны рассчитывается с помощью соотношений внешней баллистики.

Задача (1) с соответствующими граничными условиями решается приближенно с помощью вариационных методов в трехмерной постановке.

2. Исследование расположения выброшенных фрагментов активной зоны реактора. В качестве примера реализации предложенной методики далее приведены расчеты для одного из возможных вариантов (сценариев) протекания запроектной аварии. Полученные результаты не носят окончательный характер.

Анализ распределения энерговыделения по объему активной зоны непосредственно перед аварией, а также результаты компьютерного моделирования [6-8] позволяют с большой степенью достоверности утверждать, что локальный разгон реактора произошел в нижней части юго-восточной четверти активной зоны.

Разгон реактора носил локальный характер, так как при обследовании блока было обнаружено несколько практически целых ТВС, которые до взрыва были в энергетическом смысле почти не нагружены. Теплоноситель поступает в ТК из главного напорного коллектора через систему групповых распределительных коллекторов. К одному групповому коллектору подключается 48 ТК. В случае разрыва ТК рост реактивности в активной зоне ограничивается этой группой каналов.

При анализе процесса локального разгона реактора принимается следующая идеализация: зона первоначального неуправляемого разгона имеет шарообразную форму, энергия в этой области $E_{\text{раз}}$ выделяется однородно по всему объему, при этом мощность энерговыделения растет экспоненциально по времени

25

(за период $\tau_{\text{раз}}$) от своей номинальной величины до максимального значения и далее, после разрушения активной зоны, падает до некоторой величины.

Значения параметров аварийного энерговыделения ($E_{\text{раз}}$ и $\tau_{\text{раз}}$ - количество и время энерговыделения) нельзя считать надежными, в силу того, что они зависят от той или иной гипотезы, положенной в основу сценария развития аварии. Используя гидродинамическую

модель, можно определить величину $E_{\text{раз}}$. Оценка энергии базируется на интерполяции наблюдавшейся массовой выбросы блоков и обломков графита.

Для попадания на крышу блока В (отметка 74,5) куски графита должны подняться (как минимум с отметки 26,0) на высоту более 44 м. Подъем на такую высоту требует начальной скорости не менее 31 м/с. Взаимосвязь скорости графита в верхней части реактора с величиной аварийного энерговыделения получена из численного решения задачи (1)-(6).

Результаты вычислений приведены на рисунках. Рассматриваются два варианта расположения активной зоны реактора. Это, во-первых, ее штатное расположение (рис. 1, 2), и случай, когда сборка активной зоны была вытолкнута из шахты реактора в вертикальном положении на высоту 18,5 м (рис. 3).

Разрушение активной зоны в ее штатном положении Рис. 1, 2 соответствуют расположению центра области энерговыделения в точке с координатами $r=4,22$ м, $z=2,34$ м, $\varphi=135^\circ$. Здесь (r, z, φ) - цилиндрическая система координат, при этом r - расстояние от оси реакторного пространства, z - расстояние от низа активной зоны, φ - азимут. Выделилась энергия $E=1,44$ ГДж за время $\tau=12,5$ мс, импульс давления при этом составил $\Pi=8,49$ кПа·с.

Реакторный графит - это материал с выраженными анизотропными свойствами, поэтому критическая скорость v^* для графита вдоль оси экструзии и перпендикулярно ей составит, соответственно, 10,04 м/с и 4,09 м/с. Для циркония $v^*=22,3$ м/с. На рис. 1 показаны линии уровня величин критических скоростей по меридиональным сечениям активной зоны реактора. При этом цифрой 1 показана область реактора, которая будет полностью разрушена и выброшена взрывом ($v>22,3$ м/с). В рассматриваемом случае эта область занимает 16,7 % активной зоны.

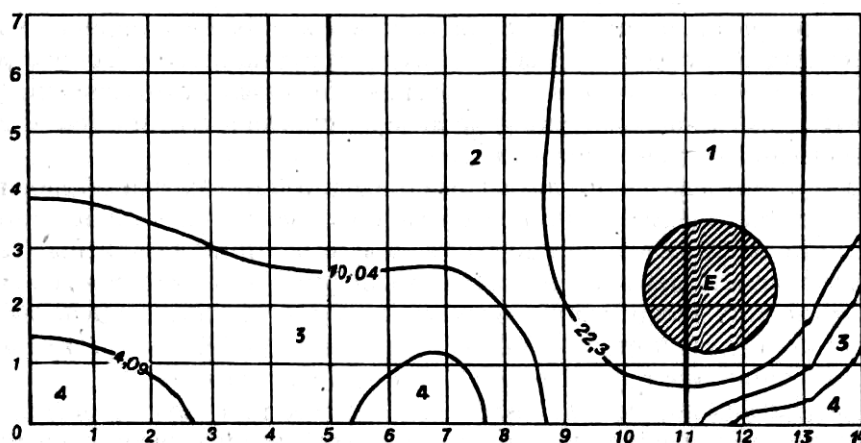


Рис. 1. Области разрушения активной зоны реактора.
Сечение северо-запад - юго-восток

26

Область 2 (53,2 % активной зоны) соответствует скоростям $10,04 \text{ м/с} \leq v \leq 22,3 \text{ м/с}$. В этой зоне будут полностью разрушены графитовые блоки, но останутся целыми циркониевые трубы. В области, обозначенной цифрой 3 (скорости $4,09 \text{ м/с} \leq v \leq 10,04 \text{ м/с}$) и составляющей 25,4 % активной зоны, произойдет частичное разрушение графита. В области 4 ($v \leq 4,09 \text{ м/с}$), которая составляет 4,8 % активной зоны, графитовые блоки совершенно не разрушены.

Область энерговыделения схематически показана на рис. 1 окружностью.

Взрыв привел к разбрасыванию большого количества фрагментов активной зоны (топливо, обломки циркониевых труб, мелкие и крупные части графитовых блоков) вблизи реактора. Их расположение характеризует не только сам взрыв, но и место, где он произошел. Объем активной зоны разбивался на призматические конечные элементы. Далее для каждого из них рассчитывалась траектория движения и определялись координаты места падения с учетом отражения от стен строительных конструкций. При этом предполагалось, что верхняя часть северной и южной стен центрального зала разрушены до отметки 53,3 м.

На рис. 2 представлено найденное на основании расчетов расположение фрагментов активной зоны реактора, выброшенных в результате аварии. Часть обломков упали обратно в шахту реактора. Всего в шахте реактора находилось приблизительно 66 % активной зоны,

примерно 26 % активной зоны находится в центральном зале (в основном у южной стены), на крыши прилегающих зданий было выброшено около 6 % активной зоны, части активной зоны, разбросанные на территории, прилегающей к станции, составляли примерно 2 %, при этом максимальное удаление выброшенных обломков примерно 0,5 км.

Разрушение активной зоны над настилом реакторного отделения. При взрыве активной зоны в ее штатном положении внутри реакторного пространства возникают достаточно большие давления. При таких нагрузках металлоконструкции бака боковой биологической защиты (схема Л) должны быть разрушены или, по крайней мере, значительно

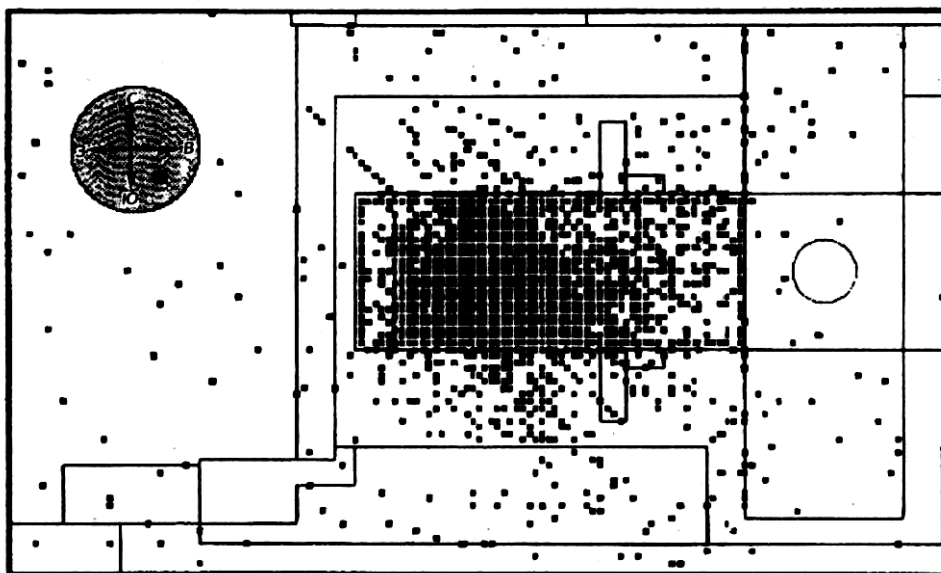


Рис. 2. Расположение фрагментов активной зоны реактора

27

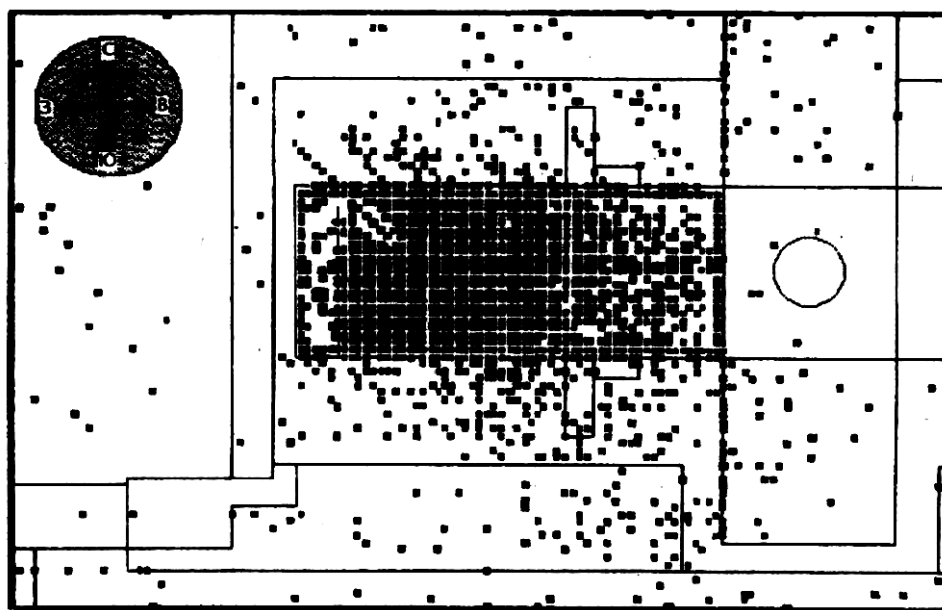


Рис. 3. Расположение фрагментов активной зоны реактора, $H=18,5$ м

деформированы. Однако проведенные обследования показали, что схема Л почти полностью сохранила воду, ее внутренняя стенка почти не имеет повреждений. Это указывает на то, что взрыв активной зоны, по-видимому, произошел вне шахты реактора. Положение частей скафандра разгрузочно-загрузочной машины, которые находятся в настоящее время на отметке 49,5 м, говорит о том, что сборка активной зоны в результате аварии поднялась вверх по крайней мере на 18,5 м.

Результаты расчетов, приведенные на рис. 3, выполнены в предположении, что активная зона была вытолкнута из шахты реактора как единое целое, поднялась на высоту $H=18,5$ м относительно своего проектного положения и уже на этой высоте произошел

взрыв. В этом случае для разрушения и разбрасывания фрагментов активной зоны со скоростями, достаточными для того, чтобы графит оказался на крыше блока В, требуется несколько большая энергия, так как взрыв происходит уже не в замкнутом объеме реакторного пространства. В рассматриваемом случае предполагается, что выделилась энергия $E=5,77$ ГДж за время $\tau=19,9$ мс, импульс давления при этом составил $P=21,38$ кПа·с.

Обратно в шахту реактора упало примерно 50 % активной зоны. В центральном зале находилось около 33 % активной зоны (си. рис. 3), на крышках прилегающих зданий - около 15 % фрагментов активной зоны, по территории промплощадки станции было разбросано примерно 2 % фрагментов активной зоны, при максимальном удалении выброшенных обломков на 1,3 км.

1. *Абалин С. С., Барьяхтар В. Г., Беляев С. Т. и др.* Обеспечение экологической безопасности объекта «Укрытие» (Исследования 1990-91 гг.) // Докл. АН Украины. - 1992. - № 1. - С. 120-125.
2. *Пазухин Э. М.* Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования // Радиохимия. - 1994. - № 2. - С. 97-142.
3. *Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В.* Теоретическая гидромеханика. Ч. 1. - М.: АН СССР, 1962. - 567 с.
4. *Лаврентьев М. А.* Вариационный метод в краевых задачах для систем уравнений эллиптического типа. - М.: АН СССР, 1962. - 136 с.

28

5. *Кузнецов В. М.* Математические модели взрывного дела. - Новосибирск: Наука: СО., 1977. - 244 с.
6. *Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия. Информация, подготовленная для совещания экспертов МАГАТЭ (Вена, 25-28 августа 1986 г.).* - Ч. 1. - Обобщенный материал. ГК ИЭА СССР, 1986, авг. - С. 4-21.
7. *Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия. Информация, подготовленная для совещания экспертов МАГАТЭ (Вена, 25-28 августа 1986 г.).* - Ч. 1]. Приложения ГК ИЭА СССР/ 1986, авг., Приложение 2, с. 1-5, 16-19, 22-38, 67-74, 81-99.
8. *Адамов Е. О., Василевский В. П., Ионов А. И. и др.* Анализ первой фазы развития аварийного процесса на четвертом блоке Чернобыльской АЭС. - Атомная энергия. 1988. - 64. - Вып. 1. - С. 24-28.

Получено 11.04.96.

УДК 539.3+621.039

Ю. В. Верюжский, П. А. Синев, С. В. Кошкин, В. В. Саркисов
МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ РБМК 1000 НА СТАДИИ ЗАПРОЕКТНОЙ
АВАРИИ

Демонстрируется применение разработанных средств численного моделирования разрушения конструкций реактора 4-го энергоблока ЧАЭС при запроектной аварии с использованием достоверных фактов о промежуточных и итоговых состояниях конструкций в качестве основы для верификации полученных результатов.

Анализ процесса запроектной аварии реактора 4-го энергоблока ЧАЭС является ключевым звеном комплексных исследований разрушений и повреждений конструктивной системы этого строительного сооружения и его технологического оборудования. Однако до настоящего времени анализ аварии 1986 г. проводился, в основном, с позиции воспроизведения хронологии и общего описания этапов аварийного процесса для технологической атомной энергетической системы [1-10], а не как объекта исследования прикладной механики.

Данная статья ставит целью разработку и применение средств численного моделирования последовательности разрушения конструкций реактора с использованием достоверных факторов о промежуточных и итоговых состояниях конструкций в качестве основы для верификации полученных результатов [11-13]. Авторы не пытаются воссоздать полную картину аварии, а только используют некоторые известные на сегодняшний день гипотезы и версии [1-10, 14-19] для разработки моделей и методики анализа разнообразных вероятных сценариев аварии, получения оценочных значений воздействий и на их основе проведения расчета на разрушение металлоконструкций (МК) реактора и технологического канала (ТК).

С целью возможности распространения разработанной методики для моделирования протекания гипотетических запроектных аварий при анализе безопасности действующих реакторов рассматривались конструктивные схемы как первой, так и второй очереди строительства энергоблоков ЧАЭС. Эти сооружения различаются, прежде всего, конструкциями аварийных паросбросных систем. В частности, в отличие от энергоблоков первой очереди в структуре энергоблоков второй очереди существенную роль играют бассейн-барбатор и связанные с ним элементы парораспределительных коммуникаций и коридоров. Эти конструктивные различия значительно изменяют характер процессов

© Ю. В. Верюжский, П. А. Синев, С. В. Кошкин, В. В. Саркисов, 1998

29

моделей и методики анализа разнообразных вероятных сценариев аварии, получение оценочных значений воздействий и на их основе проведение расчета на разрушение металлоконструкций (МК) реактора и технологического канала (ТК).

С целью возможности распространения разработанной методики для моделирования протекания гипотетических запроектных аварий при анализе безопасности действующих реакторов рассматривались конструктивные схемы как первой, так и второй очереди строительства энергоблоков ЧАЭС. Эти сооружения различаются, прежде всего, конструкциями аварийных паросбросных систем. В частности, в отличие от энергоблоков первой очереди в структуре энергоблоков второй очереди существенную роль играют бассейн-барбатор и связанные с ним элементы парораспределительных коммуникаций и коридоров. Эти конструктивные различия значительно изменяют характер процессов моделируемых запроектных аварий вследствие различия параметров силовых и температурных динамических нагрузок, а также физико-механических и геометрических представлений исследуемых элементов реакторов.

Упрощенные модели разрабатываются в рамках общих конструктивных схем реакторов. В глобальных моделях выделяются основные несущие элементы и связи между ними. Вводятся рациональные упрощения подконструкций, исходя из возможности уменьшения трудоемкости вычислений без снижения их точности. При необходимости качества глобальные модели уточняются на уровне локальных фрагментов и узлов.

Для численного исследования объектов в статической и динамической постановках используются численно-аналитический метод потенциала и метод конечных элементов. В дискретных моделях применяются стержневые, плоские и объемные элементы в рамках теорий статической и динамической термоупругости, устойчивости и разрушения.

В ходе расчета определяется напряженно-деформированное состояние (НДС) МК, которое оценивается по четвертой теории прочности [20]. Критерием является удельная потенциальная энергия формоизменения, записываемая через эквивалентные напряжения.

Подробное описание исходных данных и расчетов представлено в [11, 12].

Конструктивная схема. Для расчетов применяются упрощенные модели, созданные на основе общих конструктивных схем МК реакторов энергоблоков до запроектной аварии, которая разделяется на основные элементы (схемы) Е, Л, Д, КЖ, ОР, С [21, 22]. Здесь остановимся только на кратком описании МК, взаимосвязях между ними, нагрузках, влияющих на расчетную модель конструкции реактора. Один из вариантов исследуемой конструктивной структуры представлен на рис. 1. Здесь элементы нижней опорной части условно не показаны.

Для изготовления МК реактора в основном использовалась сталь 10ХСНД, физико-механические характеристики которой приведены в [23].

Схема Е представляет собой цилиндрическую сварную конструкцию, состоящую из верхней и нижней плит, выполненных из перфорированных листов толщиной 40 мм, обечайки и сетки внутренних вертикальных ребер жесткости толщиной 40 мм. Кроме того; в ней расположены тракты технологических каналов и другие металлоконструкции, придающие ей значительную дополнительную жесткость. Схема Е воспринимает нагрузку от

30

вышележащих схем и передает ее с помощью 16 катковых опор на схему Л. На схему Л также опирается составная цилиндрическая схема Д. Схемы ЛТ и Д представляют собой полые сварные цилиндры, разделенные на 16 вертикальных герметичных отсеков с

толщиной стенок 30 мм, внутри которых расположены ребра жесткости толщиной 30 мм. К нижней решетке схемы Е приварен верх МК схемы КЖ. Снизу КЖ приварена к верхней решетке схемы ОР, сварка произведена с предварительным натягом. Схема ОР представляет собой металлоконструкцию, аналогичную схеме Е. Она воспринимает нагрузку от элементов активной зоны реактора и передает ее на схему С. Схема С собирается с помощью фланцевых болтовых соединений из балок-стоек толщиной 40 мм, расположенных по двум взаимно перпендикулярным плоскостям в виде креста. Ребра жесткости также имеют толщину 40 мм. Нижняя часть схемы С опирается на закладные части ее фундамента. Верхний торец схемы С имеет выступы и подогнан по поверхности контакта с нижней плитой схемы ОР. Основные габариты схем приведены на рис. 1.

К схеме Е относятся верхний и нижний горизонтальные компенсаторы, обеспечивающие температурные расширения при сохранении герметичности гелий-азотных и азотных полостей. Компенсаторы не являются силовыми деталями. В схеме КЖ, окружающей активную зону, также предусмотрен компенсатор, позволяющий убрать монтажные и осевые температурные напряжения, возникающие в процессе эксплуатации. Пространство между внутренним цилиндром схемы Л и схемой КЖ заполнено азотом, давление которого превышает давление гелий-азотной смеси внутри КЖ на 0,2-1,2 кПа. Схемы Л и Д заполнены водой (биологическая защита), а схемы Е и ОР - серпентинитовой засыпкой (плотность 1,7 т/м³). Монтажное пространство, образованное внешним цилиндром схем Л и Д и бетонной шахтой, заполнено песчано-гравийной засыпкой (плотность 1,3-1,6 т/м³), которая служит дополнительной биологической защитой.

Корпус ТК представляет собой сварную конструкцию, состоящую из трех частей. Средняя часть состоит из трубы, изготовленной из сплава Zr + 2,5 % Nb, с наружным диаметром 88 мм и толщиной 4 мм. Верхняя и нижняя концевые части изготовлены из коррозионно-стойких труб (сталь 08X18H10T) различных диаметров. Соединение средней и концевых частей корпуса канала производится с помощью специально разработанных переходников сталь-цирконий. Характеристики материалов и конструкции ТК принимаются по [23, 24].

Связь ТК со схемами Е и ОР осуществляется вваренными в них трубами-трактами. В верхнем тракте (схема Е) ТК крепится с помощью упорного бурта и усикового сварного шва, в нижнем (схема ОР) - соединяется с помощью сварки с трубой-трактом металлоконструкции схемы ОР через узел сильфонного компенсатора. Это соединение позволяет компенсировать различия в температурных расширениях ТК и металлоконструкций реактора, а также создать надежную герметизацию газовой полости.

Расчетные модели. На основании описанной выше конструктивной схемы реактора сформированы его расчетные схемы.

Из конструктивной схемы следует независимость конструкций Е, Л и Д от ОР и С. Связующими звеньями между ними являются конструкции схемы КЖ, технологические каналы и компенсаторы. КЖ и компенсаторы являются, в основном, изолирующими деталями и воспринимают незначительные внешние нагрузки. Схема КЖ снабжена компенсатором, который снижает температурные напряжения вдоль оси КЖ и возможную

Геометрические параметры схемы КЖ: толщина стенки 16 мм, а в месте компенсатора - 8 мм, диаметр - 14,5 м. В качестве расчетной схемы принимаем цилиндрическую оболочку, нагруженную наружным давлением 1,2 кПа.

Принята осесимметричная расчетная схема ТК. Рассматривается действие температур и давлений на внутреннюю и наружную поверхности. Внутренний диаметр 80 мм, наружный - 88 мм. При технологическом режиме работы давление внутри 7 МПа, температура внутри 265 °С, - снаружи 325 °С.

Расчет на технологические нагрузки выполнялся для апробации расчетных схем, моделирующих МК реактора при запроектной аварии. Приведем выводы расчетов на прочность [17, 18] в виде полученного максимального эквивалентного напряжения и допустимого минимального значения предела текучести материала при рабочей температуре [21]: для схемы Е - 194 и 314 МПа; для схем Л и Д - 94 и 353 МПа; для схемы ОР - 224 и 314 МПа; для схемы С - 111 и 314 МПа; для схемы КЖ - 1,09 и 314 МПа; для ТК: в стальной части 187 и 187 МПа, в циркониевой 88 и 196 МПа. Следовательно, при технологическом режиме работы все основные МК реактора имеют достаточный запас прочности.

Для схемы С выполнен расчет на устойчивость. Исходные данные для расчетов приняты те же, что и при расчете на прочность. Учитывается влияние металлоконструкции схемы ОР, которая моделируется в виде жесткой горизонтальной пластины. В местах контакта ОР и С в соответствии с методикой расчета на устойчивость прикладываются единичные силы. По низу схемы моделируются линейные перемещения, задаваемые из расчетов податливости нижней опорной подконструкции.

На рис. 2 представлена форма потери устойчивости. Критическая сила, полученная из расчета, равна 946 МН, а прикладываемая нагрузка 30 МН, следовательно, схема С имеет значительный запас устойчивости.

Запроектная авария. Для отработки разрабатываемой методики исследований и анализа качества построенных моделей реакторов использовались различные (полные или фрагментарные) варианты протекания гипотетических аварий. Представлена одна из возможных хронологий развития разрушения реактора, которая составлена из рассмотрения ряда сценариев запроектной аварии [9, 10, 19].

Авария начинается с разрушения части ТК в юго-восточном квадранте, которое было вызвано изменением температурного режима. Ориентировочным местом начала разрушения ТК является переходник - место стыка циркониевой и стальной труб. После разрушения первых ТК рост давления в реакторном пространстве приводит к разрыву

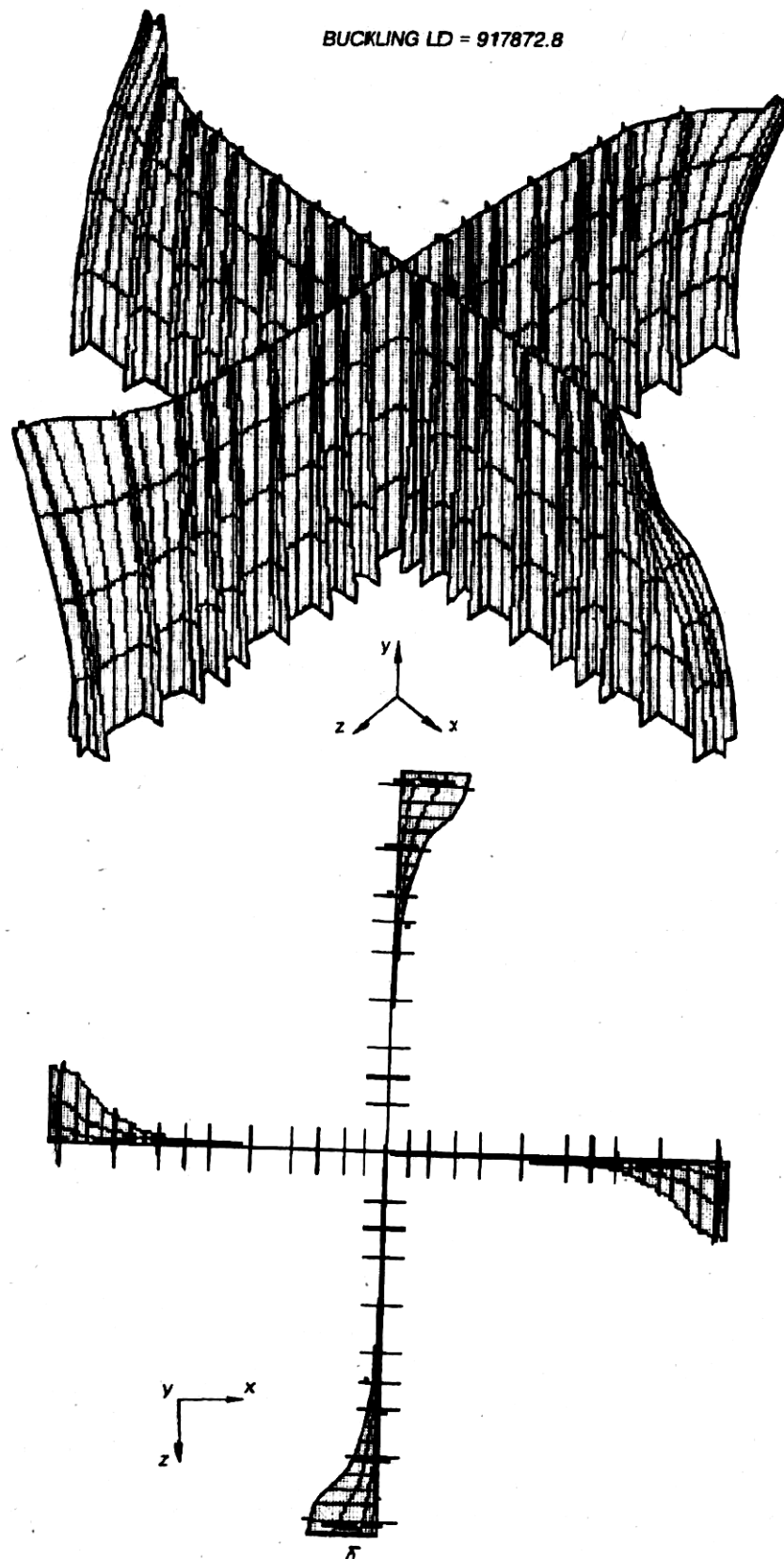


Рис. 2. Форма потери устойчивости схемы С

металлоконструкции схемы КЖ, . который начнется также с юго-восточного квадранта. Пар попадает в межреакторное пространство и воздействует на металлоконструкции схемы Л. В первый момент появления пара давление действует на часть Л, соответствующую юго-восточному квадранту, затем распространяется на всю поверхность Л. Одновременно с этим растет давление на схему ОР, вначале в юго-восточном квадранте, затем на всю площадь верхней плиты ОР. Возможно частичное разрушение схемы ОР, полное разрушение

компенсаторов между схемами и выход пара в подреакторное пространство. После разрыва КЖ начинается подъем активной зоны, схемы Е и дальнейший разрыв ТК.

Схема С воспринимает дополнительные нагрузки, передаваемые через схему ОР, а в случае выхода пара в подреакторное пространство при разрушении диафрагм между схемами ОР и Л подвергается давлению на части поверхности. Это давление может возникнуть и в результате возгорания различных газов в подреакторном пространстве [9]. Если в технологическом режиме мы полагали, что схема С не подвергается значительному перепаду температур, то в результате аварии такой перепад может возникнуть.

Подъем схемы Е вместе с АЗ приводит к разрыву верхних коммуникаций. При достижении высоты около 14 м [10] происходит второй взрыв, после которого схема Е падает на схему Л.

Для рассматриваемого варианта развития аварии в [12] получены ориентировочные максимальные значения давлений в активной зоне, равные 1,7-2,5 МПа. Рост давления происходит достаточно «медленно» за время порядка десятых долей секунды, поэтому рассматриваемые МК можно моделировать в квазистатической постановке, обоснование которой и определение коэффициентов перегрузки выполнено в [12] на основе динамических расчетов.

Анализ возможных ситуаций развития аварии выполняется на тех же моделях, что и при расчете на технологические нагрузки.

Ниже на рисунках представлены результаты расчетов в виде муаровых картин эквивалентных напряжений. Картины снабжены соответствующей градацией значений напряжений в мегапаскалях. Для наглядности результаты показаны на деформированных схемах, полученных путем масштабирования в сторону увеличения значений перемещений узлов без изменения масштаба габаритов конструкций.

Технологические каналы (ТК). Исходя из предположения, что при запроектной аварии внутри канала происходил рост температуры, определяли значения внутренних температур, при которых происходит разрушение стальной и циркониевой труб и переходного соединения, оставляя при этом значение наружной температуры на технологическом уровне (325 °С). Взаимодействие с графитом и учет коррозии ТК представлены в работах [25, 26].

В качестве предельных температур принимались такие, при которых значения эквивалентных напряжений будут больше значения предела временного сопротивления, для стали равного 382 МПа, а для циркония - 294 МПа.

В результате расчета оказалось, что разрушение начнется в месте переходника при температуре внутри ТК около 485 °С. В дальнейших расчетах использовались методика на разрушение [12], которая выполнялась путем итераций. На каждом шаге итерации анализировали НДС на основе выбранного критерия (минимальный предел временного сопротивления), разрушенные элементы или связи между элементами убирали и задача пересчитывалась заново. На рис. 3, а-и показаны осесимметричная расчетная схема и

35

картины напряженно-деформированного состояния, характеризующие процесс разрушения переходного соединения. Процесс разрушения начинается в нижней части переходного соединения в месте контакта стальной и циркониевой труб (рис. 3), и далее развивается вдоль линии контакта в стальной части. Здесь видно раздутие технологического канала, которое может привести к его заклиниванию в графитовой кладке. Последняя стадия разрушения переходного соединения и образование щели, через которую вырывается пар в АЗ, представлена на рис. 3, з, и.

Схема КЖ. На схему действуют давление азота в межреакторном пространстве 1,2 кПа и давление пара в реакторном пространстве. Наиболее слабым местом является компенсатор.

Определено внутреннее давление из условий прочности КЖ в месте компенсатора, которое составило 0,52 МПа. Оценка давления выполнена сверху, так как на прочность схемы сильно влияет задаваемый график набора давления внутри АЗ [12].

Схема Л. При попытке восстановить последовательность событий, происходивших во время аварии, можно использовать ряд фактов, достоверность которых считается установленной. Учтем, что МК схемы Л остались целыми, кроме того, в них даже сохранилась вода [9]. Отсюда следует, что пороговое значение, при котором МК схемы Л разрушаются, при аварии не было достигнуто. Поэтому задача об определении максимального давления, которое способно выдержать конструкции схемы Л, представляет собой значительный интерес.

При расчете схемы Л на запроектную аварию, кроме технологических нагрузок, рассматривалось несколько вариантов аварийного воздействия на внутреннюю стенку [12]. Выделим два из них: распределенное давление по высоте на всю стенку, равное 2,5 МПа; распределенное давление по высоте на юго-восточную четверть, равное 2,5 МПа.

В результате расчета получено максимальное значение эквивалентных напряжений, по первому варианту равное 417 МПа, по второму - 671 МПа при минимальном значении временного сопротивления при температуре 100 °С - 481 МПа. Так как давление действовало на схему Л некоторым нерегулярным образом, не соответствующим ни первой, ни второй схеме, то можно предположить, что давление в реакторном пространстве не превышало 2,5 МПа.

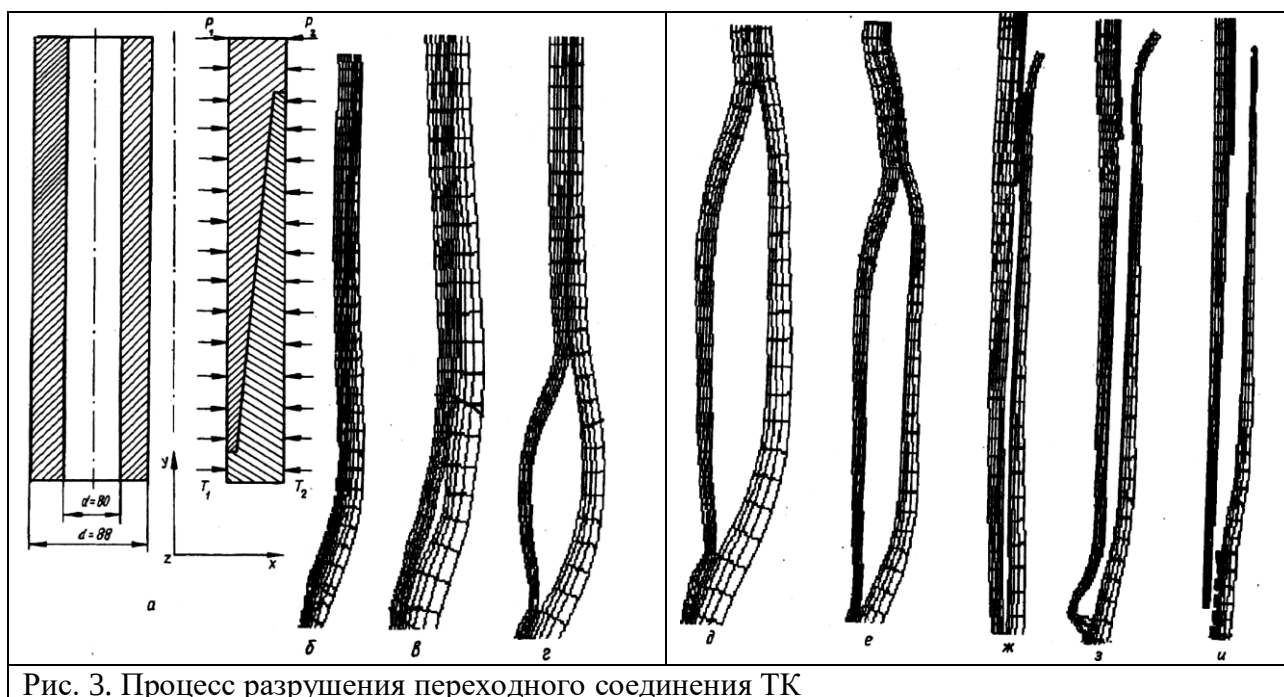


Рис. 3. Процесс разрушения переходного соединения ТК

36-37

Схема ОР. При расчете МК схемы на различные варианты нагружений, вызванные запроектной аварией, выбирались те, которые дают возможность оценить величину нагрузки, необходимую для того, чтобы металлоконструкция схемы ОР изменила свое проектное положение или была частично разрушена [12].

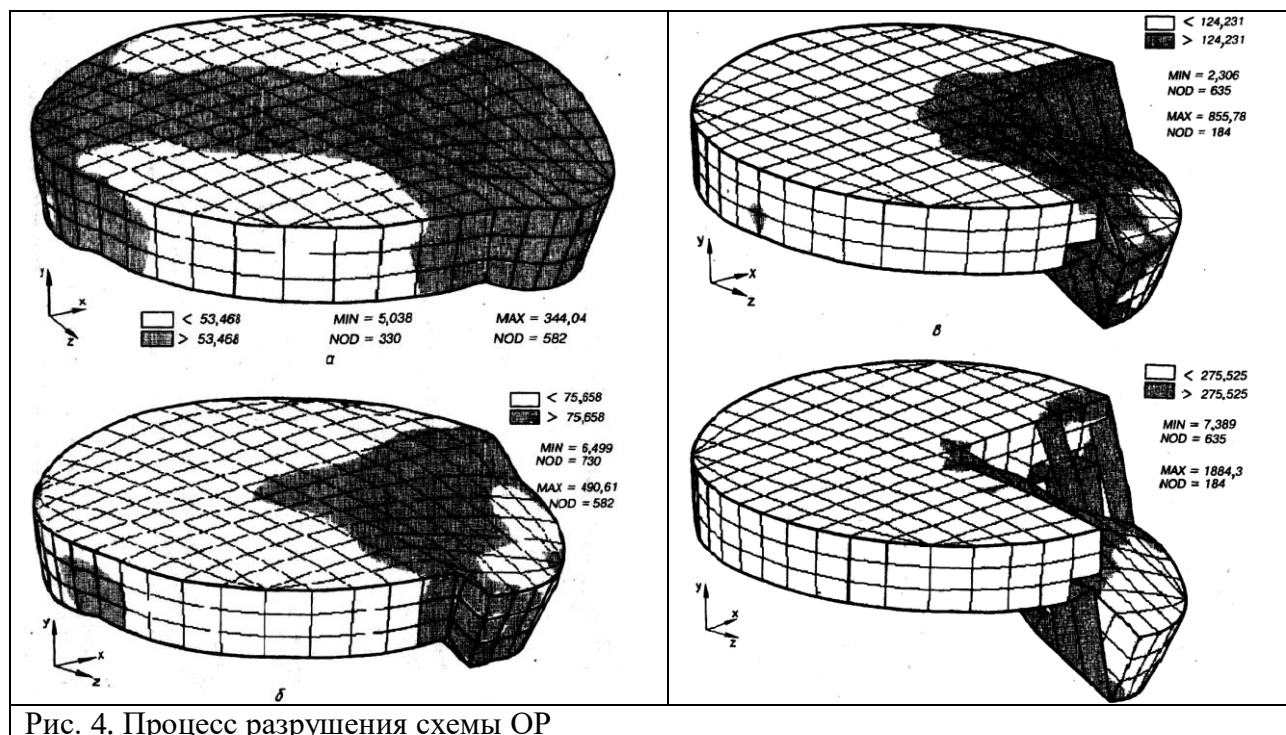
Представим два из них. В обоих вариантах нагружения действуют технологические нагрузки, дополнительное давление на верхнюю плиту величиной 2,5 МПа, а температура увеличена до 400 °С. Однако в первом варианте дополнительная нагрузка приложена по всей поверхности верхней плиты, во втором - в юго-восточной четверти. В качестве критерия оценки НДС использовался предел временного сопротивления стали 461 МПа. Сопоставляя это значение со значениями напряжений, возникающими в конструкции при рассматриваемых нагружениях, можно отметить следующее:

при нагружении верхней плиты схемы распределенным по всей площади давлением и температурой 400 °С нарушение целостности конструкции может наступить в момент, когда величина давления составит порядка 1,9 МПа;

при нагружении одной четверти верхней плиты избыточным давлением и повышении в этом квадранте температуры для разрушения конструкции в рассматриваемом месте необходимо давление величиной 2,1 МПа.

Схема С. Расчет МК схемы С соответствует расчету схемы ОР, но при этом возникают дополнительные варианты нагружения, связанные с прорывами газов в подреакторное пространство.

При некоторых сценариях аварии возможно нарушение температурного режима схемы С, что моделировалось перепадом температуры по ее высоте в 220 °С. При проникновении пара или газов в подреакторное пространство возникают моменты, когда давление действует на плоскости двух из четырех ветвей схемы. Для анализа результатов использовался предел временного сопротивления 471 МПа.



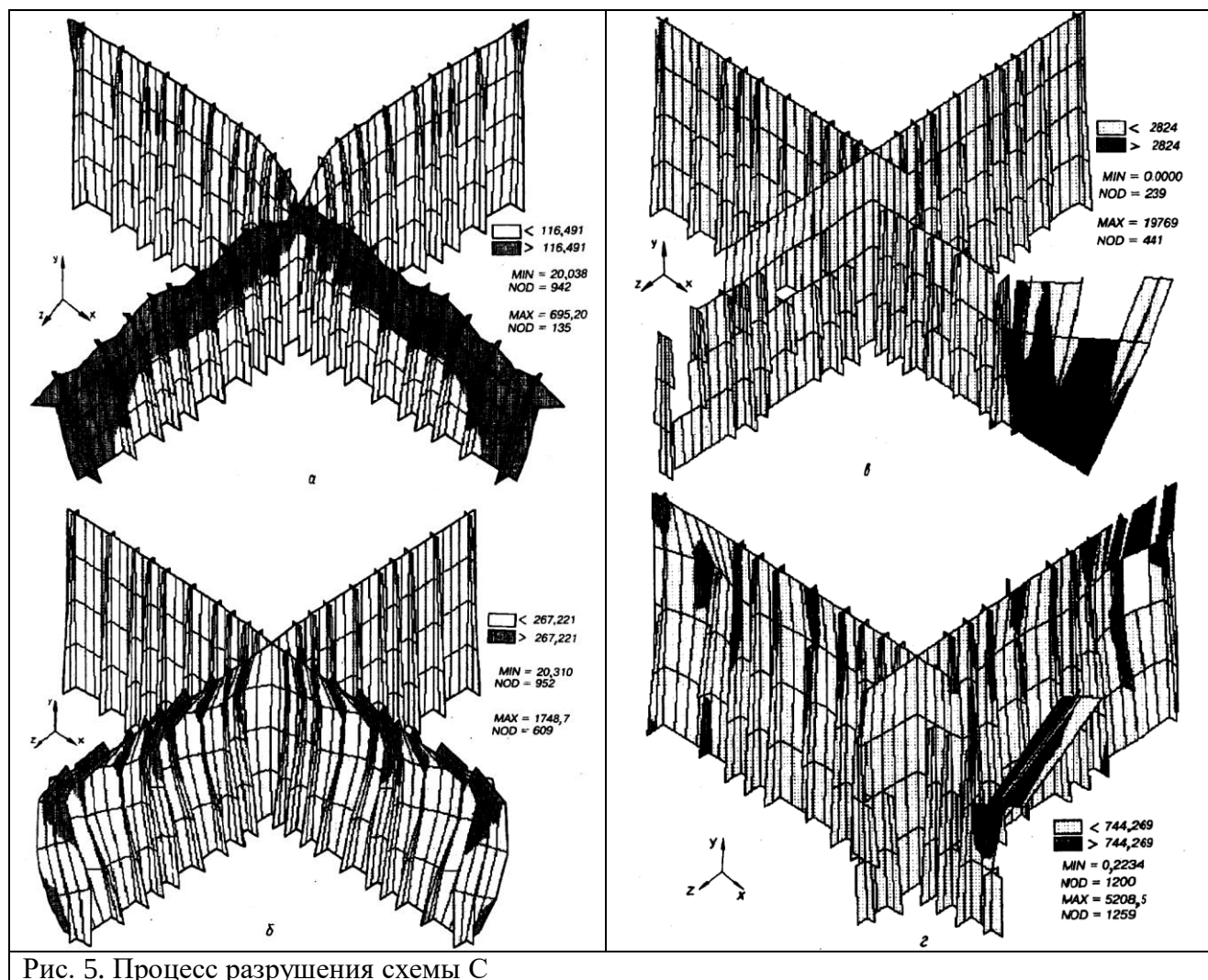


Рис. 5. Процесс разрушения схемы С

40-41

Выполненные в [12] расчеты для схемы С позволяют заметить следующее:

- при моделировании повышенного давления 2,5 МПа на схему ОР максимальные эквивалентные напряжения в схеме С составляют 695 МПа, т. е. начинается ее разрушение;
- при моделировании перепада температуры по высоте схемы С максимальные эквивалентные напряжения составляют 563 МПа, что вызывает ее разрушение;
- влияние давления в подреакторном пространстве резко ухудшает НДС схемы С и приводит к ее разрушению при давлениях порядка 0,5 МПа.

При расчете на устойчивость схемы С величина критической силы составляет 946 МН, что превосходит суммарную нагрузку на схему С, равную 440 МН при давлении в АЗ 2,5 МПа.

В качестве еще одного примера анализа рассмотрим возможный вариант разрушения схем ОР и С, в котором учитывается совместное действие давления и температуры.

В первый момент на схемы действуют технологические нагрузки. Затем к ним в юго-восточной четверти добавляется давление пара, которое растет до 2,5 МПа. В результате пар прорывается в подреакторное пространство и действует на схему С. Расчет выполняется по итерациям. На каждом шаге расчета (итерации) после корректировки расчетной схемы и воздействий на нее задача пересчитывается вновь до стабилизации результатов. Часть результатов приведена на рис. 4, 5, на которых представлены на деформированных схемах отдельные шаги расчета с картинками эквивалентных напряжений. Показаны возможность разрушения в юго-восточном квадранте схемы ОР и разрушение схемы С на стадии запроектной аварии.

Основным результатом является отработка методики расчета конструкций реактора на разрушение при анализе целостной конструктивной модели реактора на события, составленные из рассмотрения ряда сценариев запроектной аварии. Согласно этой модели

относительно автономными являются МК схем Е, Л и Д, с одной стороны, и ОР и С, с другой.

Представленные результаты расчетов демонстрируют возможности методики и численные средства их реализации с количественным уточнением некоторых характеристик аварии [9, 10]:

подтверждена вероятность разрушения ТК в районе переходника; получена оценка сверху для давления, разрушающего компенсатор схемы КЖ - 0,52 МПа;

получена оценка максимального давления в реакторном пространстве из условия целостности схемы Л - 2,5 МПа;

показано, что это давление и повышение температуры на верхней плите схемы ОР может привести к нарушению целостности МК схемы ОР в юго-восточном квадранте и разрушениям МК схемы С.

Разработанные методика и модели могут быть полезны при качественном и количественном анализе различных версий протекания аварии 26 апреля 1986 г.

42

1. *Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия. (Информация, подготовленная для совещания экспертов МАГАТЭ):* Вена, 25-28 августа 1986 г. - Ч. 1. Обобщенный материал. ГК ИЭА СССР, 1986, авг. - С. 4-21.
2. *Ishikawa M., Schiozawa S., Wakabayashi T. et al. An Examination of the Accident Scenario in the Chernobyl Nuclear Power Station // Nucl. Safety.* - 1987. - 28. - N 4. - P. 448-454.
3. *Soviets change RBMK control rod design... // Nucl. Engng. Intern.* - 1987. - 32. - N 400. - P. 9.
4. *Kirchner G., Noack C. Core history and Nuclide Inventory of the Chernobyl Core at the Time of Accident // Nucl. Safety.* - 1988. - 29. - N 1. - P. 1-5.
5. *Fletcher C., Chambers R., Balandes M., Dallman R. Simulation of the Chernobyl Accident // Nucl. Engng. Design.* - 1988. - 105. - N 2. - P. 157-172.
6. *Wakebayashi T., Havamizu Y., Kitahara T. Analysis of the Chernobyl Reactor Accident (11) // Nucl. Engng. Design.* - 1988. - 106. - N 2. - P. 163-178.
7. *Адамов Е. О., Василевский В. П., Ионов А. И. и др. Анализ первой фазы развития аварийного процесса на четвертом блоке Чернобыльской АЭС // Атомная энергия.* - 1988. - 64. - Вып. 1. - С. 24-28.
8. *Оценка механических разрушений на 4-м блоке ЧАЭС: (Отчет по НИР) - ИАЭ им. И. В. Курчатова.* - Москва, 1989 г.
9. *Хронология процесса развития последствий аварии на 4-м блоке ЧАЭС и действия персонала по их ликвидации // Отчет по НИР, МНТЦ «Укрытие» (1-й этап) по х/д № 100/89.* - Чернобыль - Киев, 1990. - 167 с.
10. *Эдвард Э. Пурвис III и МНТЦ «Укрытие». Сценарий Чернобыльской аварии по состоянию на апрель 1995 г. - НАН Украины, МНТЦ «Укрытие», Чернобыль.* - 1995. - 147 с.
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, 1995. - 9 кн.
12. *Исследование и численное моделирование надежности ответственных конструкций, фунтов и фунтовых вод основания объекта «Укрытие» // Отчет по НИР, МНТЦ «Укрытие» по теме 1.1 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский.* - Кн. 4: Начальная стадия аварии Чернобыльской АЭС. Расчет металлоконструкций и технологического оборудования реактора на эксплуатационные и запредельные аварийные нафузки. - № ГР 0195U003875. - Чернобыль - Киев, 1995. - 380 с. - 14 кн.
13. *Отчет по безопасности (оценке 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.
14. *Габараев Б. А., Миронов Ю. В., Новосельский О. Ю. и др. Динамика давления в реакторном пространстве РБМК // Атомная энергия.* - 1990. - 69. - Вып. 4. - С. 253-255.
15. *Расчетный анализ начальной стадии аварии на Чернобыльской АЭС / А. А. Абагян, И. М. Аршавский, В. М. Дмитриев и др. - Атомная энергия.* - 1991. - 71. - Вып. 4. - С. 275-287.
16. *Безбатченко Н. И., Котельников Г. А., Нефедова Л. Н. и др. Моделирование аварии на ЧАЭС // Атомная техника за рубежом.* - 1992. - 12. - С. 3-11.
17. *Миронов Ю. В., Никитин Ю. М., Фомичева Т. И., Доморадов А. Е. Анализ динамики РБМК-1000 при разрыве напорного коллектора на малой мощности // Атомная энергия.* - 1993. - 75. - Вып. 2. - С. 88-92.
18. *Анализ аварии на Чернобыльской АЭС с учетом разрушения активной зоны / А. А. Афанасьева, А. М. Федосов, Р. Дондерер и др. - Атомная энергия.* - 1994. - 77. - Вып. 2. - С. 87-93.
19. *Общая характеристика аварии на ЧАЭС и ее последствий // Информация к национальному докладу на международных конференциях в связи с 10-летием Чернобыльской катастрофы.* - 1995. - 14 с.
20. *Тимошенко С. П. Сопротивление материалов. -Т. 1. - М.: Физматиздат, 1960.* - 379 с.
21. *Техническое описание установок, систем и оборудования I очереди Чернобыльской АЭС // Министерство атомной энергетики СССР. ПО «Комбинат». ЧАЭС им. В. И. Ленина. Чернобыль, 1988.* - 141 с.

22. Доллежалъ Н. А., Емельянов И. Я. Канальный ядерный энергетический реактор. - М.: Атомиздат, 1980. - 208 с.
23. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 526 с.
24. Физические величины. Справочник. / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 900 с.

43

25. Сергеева Л. В., Тутнов А. А. Расчетное исследование термомеханического взаимодействия труб технологических каналов и элементов графитовой кладки канального реактора // Атомная энергия. - 1990. - 68. - Был. 4. - С. 236-241.
26. Карасев В. С., Чирко Л. И., Тутнов А. А. и др. Модульная коррозия циркониевых труб канальных реакторов // Атомная энергия. - 1992. - 72. - Вып. 2. - С. 124-130.

Получено 11.04.96.

УДК 624.05:539.3

Н. Г. Ищенко, А. В. Шимановский, Н. А. Сирота, М. В. Герасимова

**ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ 4-ГО ЭНЕРГОБЛОКА ЧАЭС
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ЕГО КОНСТРУКЦИЙ
В ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ, АВАРИЙНОМ И ПОСТАВАРИЙНОМ СОСТОЯНИЯХ**

С использованием архивной документации построена конструктивная схема эксплуатационного состояния 4-го энергоблока ЧАЭС. Разработаны различные варианты пространственных конечно-элементных моделей, позволяющих с различной степенью детализации реализовать конструктивную схему 4-го энергоблока с помощью различных вычислительных комплексов COSMOS, SCAD и ROBOT. Выполнены расчеты характерных напряженно-деформированных состояний 4-го энергоблока при различных сочетаниях нагрузок и воздействий для оценки эффективности разработанных вариантов конечно-элементных моделей. На основе анализа полученных результатов произведен выбор расчетной модели 4-го энергоблока ЧАЭС для дальнейших численных исследований механического поведения его конструкций, в том числе в процессе запроектной аварии и в ходе локализации и ликвидации ее последствий.

Настоящая работа выполнена в рамках проблемы обеспечения безопасной эксплуатации существующего объекта «Укрытие» 4-го энергоблока ЧАЭС. Цель данной работы заключалась в следующем:

построение конструктивной схемы доаварийного 4-го энергоблока ЧАЭС на основе анализа сохранившейся проектной и конструкторской документации на строительство 2-й очереди ЧАЭС;

разработка пространственных конечно-элементных моделей, позволяющих с различной степенью детализации реализовать построенную конструктивную схему с помощью вычислительных комплексов (БК) COSMOS, SCAD и ROBOT;

выполнение расчетов характерных доаварийных напряженно-деформированных состояний 4-го энергоблока при различных сочетаниях нагрузок и воздействий для оценки эффективности разработанных вариантов конечно-элементных моделей;

выбор на основе анализа полученных результатов рациональной расчетной схемы предаварийного 4-го энергоблока ЧАЭС для дальнейших численных исследований, в том числе процесса развития запроектной аварии реактора и определения поставарийного состояния его конструкций.

Конструктивная схема объекта. Построение конструктивной схемы 4-го энергоблока ЧАЭС выполнено с учетом всех его несущих строительных конструкций. При этом их геометрия соответствует реальной геометрии стен, перекрытий и каркасной части блока.

Перегородки толщиной менее 0,05 м при построении конструктивной схемы не учитывались ввиду малого влияния их жесткости на общее напряженно-деформированное

© Н. Г. Ищенко, А. В. Шимановский, Н. А. Сирота, М. В. Герасимова, 1998

44

состояние объекта. По этой же причине в конструктивную схему не включены: сборные перекрытия, расположенные между осями 50-51; проемы в стенах и перекрытиях, размеры

которых в обоих направлениях не превышают 1,5 м; навесные стеновые панели ограждения и конструкции реактора.

Конечно-элементные модели строительных конструкций для численных исследований. Ввиду сложной конструкции 4-го энергоблока ЧАЭС, с целью проверки результатов расчетов и подтверждения принятых исходных предпосылок и допущений, при формировании его конечно-элементных моделей использовались три вычислительных комплекса: COSMOS (версия 1.52A) [1], SCAD (версия 6.1) [2] и ROBOT (версия V6 v.3.0) [3].

Выбор конечно-элементных моделей для проведения дальнейших исследований проводился на основе анализа результатов расчетов эксплуатационного состояния 4-го энергоблока ЧАЭС, которое рассматривалось как контрольное и использовалось для отработки эффективного численного аппарата последующего моделирования процесса развития запроектной аварии реактора и поставарийного поведения конструкций блока.

Модель для проведения численных исследований с использованием ВК COSMOS. В связи с наличием ряда ограничений в используемой версии ВК COSMOS, при построении конечно-элементной модели 4-го энергоблока применен суперэлементный подход. Общая расчетная модель рассматриваемого сооружения состоит из отдельных составляющих фрагментов единого расчетного блока - суперэлементов (рис. 1), каждый из которых в свою очередь собран с использованием отдельных фрагментов - «поэтажных планов».

Учитывая, что с конструктивной точки зрения рассматриваемое сооружение представляет собой комбинированную систему весьма сложной конфигурации, включающую в себя элементы различной мерности и жесткости, при построении его расчетной модели использовались оболочечные и стержневые конечные элементы. Так, железобетонный каркас объекта описан стержневыми конечными элементами, воспринимающими усилия растяжения - сжатия и изгиба, для которых приняты реальные геометрические и жесткостные характеристики. Стены и перекрытия 4-го энергоблока аппроксимировались четырехузловыми оболочечными конечными элементами, толщина которых соответствовала реальной толщине стен и перекрытий сооружения. Модуль упругости материала указанных конструкций E принят равным $2,4 \cdot 10^4$ МПа, а коэффициент Пуассона $m=0,28$.

Количество узлов и конечных элементов в каждом суперэлементе соответственно равно: первый суперэлемент - 1865 и 2015; второй суперэлемент - 1865 и 2016; третий суперэлемент - 1250 и 1238; четвертый суперэлемент - 1220 и 1208; пятый суперэлемент - 1902 и 2048; шестой суперэлемент - 1810 и 1860. Нанесенная на данную конструкцию сеть конечных элементов содержит 9912 узлов и 10385 конечных элементов. Суперэлементы соединены друг с другом с помощью суперузлов, обеспечивающих работу всего объекта как единою целого. Учитывая ограничения, установленные в ВК COSMOS, для соединения всех шести суперэлементов в единую расчетную модель в данной модели используется 186 суперузлов.

Модель для проведения численных исследований с использованием ВК SCAD. В связи с тем, что ВК SCAD обладает большими возможностями в отношении порядка системы разрешающих уравнений, при формировании числовой модели могут быть

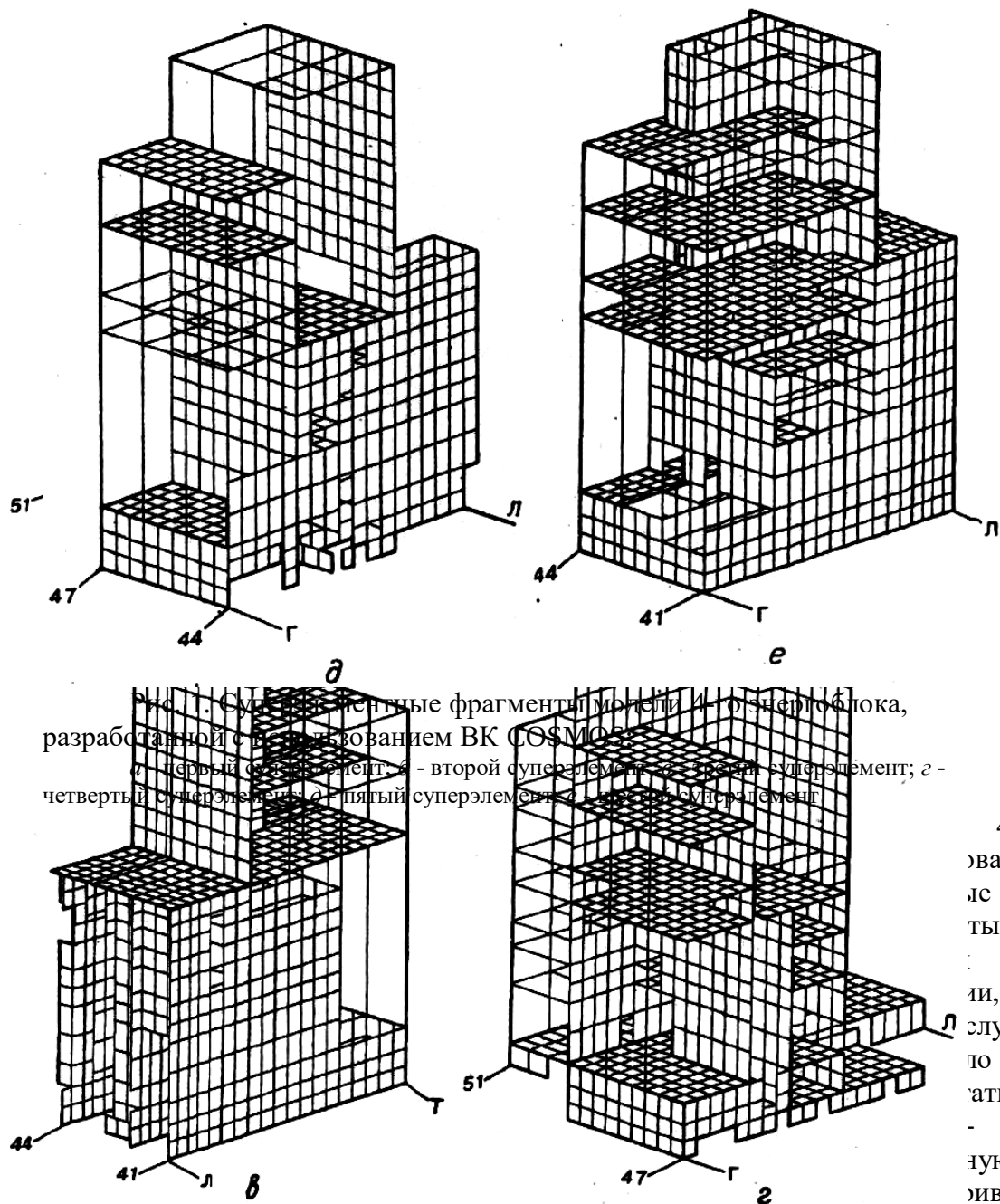


Рис. 1. Суперэлементные фрагменты модели 4-го энергоблока, разработанной с использованием ВК COSMO3D:
1 - первый суперэлемент; 2 - второй суперэлемент; 3 - третий суперэлемент; 4 - четвертый суперэлемент; 5 - пятый суперэлемент; 6 - шестой суперэлемент.

46-47

ованы
ле
ты более

и, чем в
случае. Это
по
ать вторую

ную модель
иваемого

сооружения как

общую для всего 4-го энергоблока без применения суперэлементного подхода (рис. 2). При этом она также собрана из отдельных фрагментов - «поэтажных планов», в данном случае единых для всего объекта. Нанесенная на рассматриваемую конструкцию сеть конечных элементов содержит 9668 узлов и 10385 конечных элементов.

Поскольку в обеих моделях топологическая сеть конечных элементов идентична, количество конечных элементов в них совпадает, а количество узлов в первой модели больше, так как при стыковке суперэлементов сливаются только суперузлы. При этом конечно-элементная аппроксимация, физико-механические и геометрические характеристики конечных элементов во второй модели полностью совпадают с соответствующими характеристиками первой модели.

Модель для проведения численных исследований с использованием ВК ROBOT.

Третья конечно-элементная модель разработана с использованием ВК ROBOT (рис. 3). В данной модели приняты некоторые упрощения при отображении конструктивной схемы объекта на расчетную: не учтен каркас между осями 50-51, стены по осям Е-Ж и П-Р, а также стены по осям 46, 47 и 48 в отметках +0,0 + +9,0 м, вместо них с целью сохранения общей жесткости сооружения низ стен в осях Д-Е и Р-С опущен до отметки +0,0 м. Все остальные основные несущие стены между осями 42-50 и Д-С в отметках +0,0 ÷ +56,0 м и главные

перекрытия на отметках +9,00 м, +31,5 м и +50,0 м представлены в конечно-элементной модели.

Нанесенная на рассматриваемую конструкцию сеть конечных элементов содержит 1880 узлов и 2104 конечных элемента. При аппроксимации строительных конструкций 4-го энергоблока в данной модели использовались четырехугольные и треугольные оболочечные конечные элементы, толщина которых соответствовала реальной толщине стен и перекрытий.

Граничные условия. Поскольку в представленной работе ставилась цель построения расчетных моделей 4-го энергоблока с использованием трех различных вычислительных комплексов и их последующего сопоставления, то в соответствии с обычными предпосылками расчета строительных объектов податливость основания не учитывалась. Поэтому условия закрепления реализованы в виде полного защемления нижней грани стеновых конструкций.

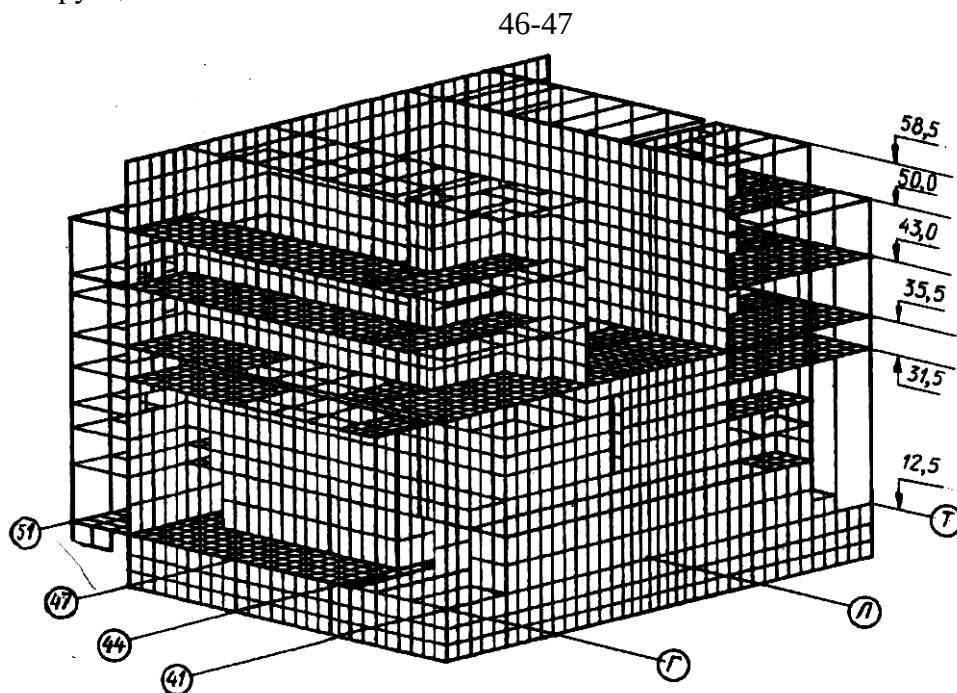


Рис. 2. Конечно-элементная модель 4-го энергоблока, разработанная с использованием BK SCAD

Действующие нагрузки и их сочетания. Исследование работы конструкций 4-го энергоблока произведено с учетом действующих на него постоянных, временных и некоторых экстремальных нагрузок. К учтенным в расчетах постоянным нагрузкам относятся собственный вес строительных конструкций 4-го энергоблока и вес технологического оборудования. Собственный вес конструкций во всех используемых ВК учитывался автоматически, а собственный вес некоторых, не вошедших в конечно-элементные модели конструкций, учитывался в месте их расположения в виде приложенных к несущим элементам соответствующих сосредоточенных и распределенных нагрузок. Вес технологического оборудования учтен для барабанов-сепараторов, главных циркуляционных насосов, разгрузочно-загрузочной машины РЗМ-488 и реактора РБМК-1000.

Согласно [4] масса одного барабана-сепаратора в рабочем состоянии составляет 2,745 МН. В 4-м энергоблоке находится всего четыре барабана-сепаратора, нагрузка от которых приложена в местах их опирания на соответствующие перекрытия на отметке +31,5 м в виде сосредоточенных сил.

В соответствии с [4] вес одного главного циркуляционного насоса составляет 0,69 МН. В 4-м энергоблоке находится всего восемь главных циркуляционных насосов, нагрузка от которых приложена в местах их опирания на перекрытие на отметке +12,5 м в виде сосредоточенных сил.

Основным элементом разгрузочно-загрузочной машины является тележка крана общим весом 2,0 МН. Отметка расположения РЗМ-488 совпадает с верхом крышки реактора, поэтому ее вес приложен в виде распределенной, нагрузки интенсивностью 0,0568 МПа на опоры реактора, которые моделировались крестообразной конструкцией; их верх находится на отметке +16 м. Вес реактора РБМК-1000 также приложен к его опорам в виде распределенной нагрузки интенсивностью 1,1 МПа.

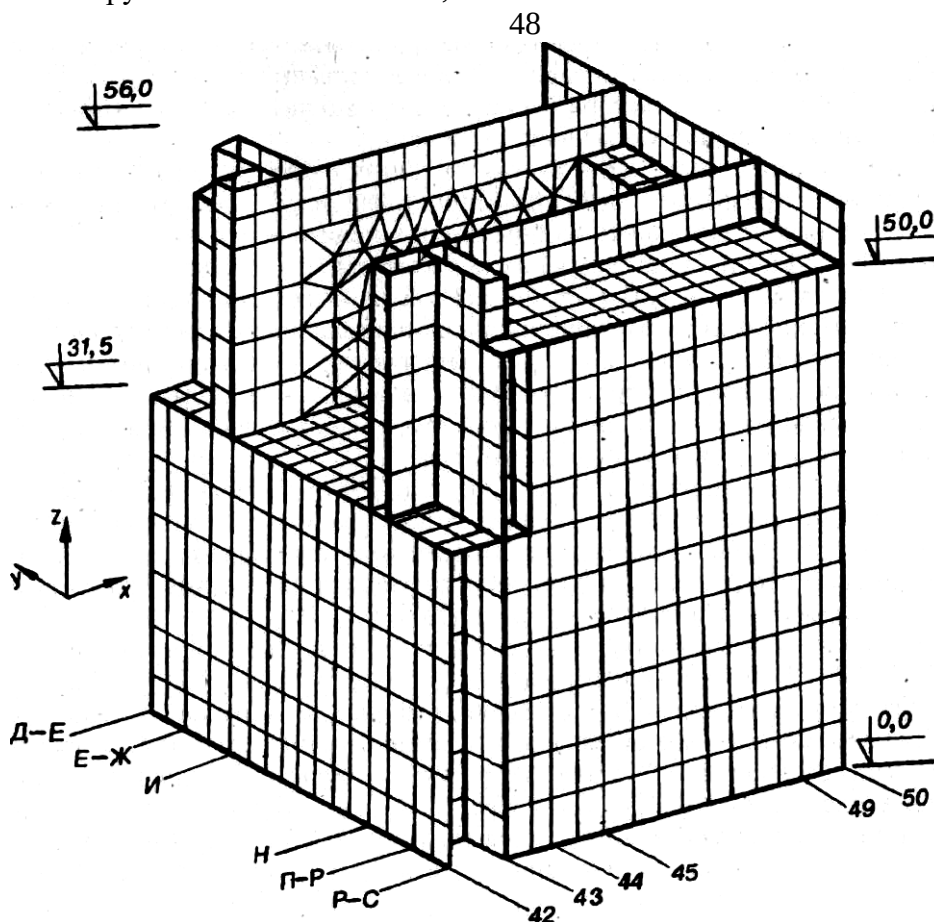


Рис. 3 Конечно-элементная модель 4-го энергоблока, разработанная с использованием BK ROBOT

В качестве временных нагрузок учтены снеговая и ветровая нагрузки, значения которых определены в соответствии с требованиями [5] и представлены в [6].

Анализ результатов расчетов. Расчет описанных выше конечно-элементных моделей 4-го энергоблока проведен на три сочетания нагрузок, включающих в себя: первое - собственный вес сооружения, нагрузку от технологического оборудования, снеговую и ветровую нагрузки в направлении «Запад-Восток»; второе - собственный вес сооружения, нагрузку от технологического оборудования, снеговую и ветровую нагрузки в направлении «Север-Юг»; третье - собственный вес сооружения, нагрузку от технологического оборудования и сейсмическое воздействие в направлении «Запад-Восток». Кроме того, проведен расчет на четвертое нагружение в виде равномерного избыточного давления интенсивностью 0,1 МПа, приложенного на конструкции помещения центрального зала.

Указанные нагрузки и их сочетания не охватывают всего многообразия нагрузок и воздействий в эксплуатационном состоянии на строительные конструкции 4-го энергоблока, поскольку результаты выполненных расчетов использовались, в основном, для оценки эффективности разработанных вариантов конечно-элементных моделей. В последующих

исследованиях выбранная рациональная конечно-элементная модель применялась для численного моделирования процесса развития запроектной аварии реактора и определения поставарийного поведения конструкций разрушенного блока [7].

Выбор конечно-элементной модели для проведения дальнейших исследований проводился на основе сопоставления результатов расчетов, выполненных с помощью различных вычислительных комплексов, а также на основе анализа присущих комплексам возможностей.

Сопоставление результатов по каждой из описанных выше моделей на статические и динамические нагрузки показал достаточно хорошее их совпадение. Например, параметры напряженно-деформированного состояния по первой и второй моделям совпадают в пределах 5-7 % [6], что объясняется почти полным подобием не только их топологических схем, но и размеров конечных элементов.

По второй и третьей моделям, поскольку они различаются степенью детализации конструктивной схемы, сопоставление результатов расчета проводилось для идентично расположенных узлов и элементов. Анализ показывает, что различие полученных результатов по сравнению со второй моделью находится в пределах 11-13 % [6].

Исходя из ограничений и возможностей, присущих принятой версии ВК COSMOS, расчет конструкции 4-го энергоблока можно провести только в суперэлементной постановке, которая не позволяет выполнить решение рассматриваемой задачи в динамической постановке на действие сейсмических воздействий, ветровых, импульсных и других нестационарных нагрузок. Тем не менее, эта конечно-элементная модель наиболее удобна для решения отдельных локальных задач как в линейной, так и в нелинейной постановке, связанных с уточнением результатов расчетов или с учетом локальных внешних воздействий для каждого отдельного суперэлемента.

Ограничения и возможности ВК SCAD позволяют достаточно эффективно с относительно небольшими временными затратами провести статические расчеты 4-го энергоблока ЧАЭС, не прибегая к суперэлементной постановке, без учета и с учетом геометрической и физической нелинейности. При этом результаты получаются более достоверными по сравнению с результатами суперэлементного подхода в связи с более точным учетом взаимодействия отдельных составляющих конечно-элементной модели фрагментов. При решении же динамических задач с использованием второй конечно-элементной модели затраты машинного времени значительно возрастают, что не всегда приемлемо. Поэтому для решения задач в динамической постановке целесообразно применение более простой (упрощенной топологически) конечно-элементной модели, которая разработана с использованием ВК ROBOT.

1. *User reference manual for COSMOS / M BASIC SYS.* - Los Angeles Structural Research & Analysis Corp., 1989. - 694 p.
2. *Руководство пользователя вычислительным комплексом SCAD.* - Киев: НПП «Топаз-Информ», 1996. - 528 с.
3. *User reference manual for ROBOT // Meylan: RoboBAT.* - 1995. - 348 p.
4. *Дополнительная экспертиза состояния строительных конструкций укрытия аварийного блока ЧАЭС // Отчет по НИР, НИИМБП по договору № 5-МБПот 04.01.94 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский.* - Кн. 4: Исследование напряженно-деформированного состояния строительных конструкций 4-го энергоблока ЧАЭС и объекта «Укрытие» - Киев, 1995. - 66 с.
5. *СНИП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия».* - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. - 36 с.

50

6. *Исследование и численное моделирование ответственных конструкций и грунтов основания объекта «Укрытие» // Отчет по НИР, НИИМБП / Руководитель темы Ю. В. Верюжский.* - Кн. 3: Построение расчетной модели 4-го энергоблока ЧАЭС для численных исследований - Киев, 1996. - 114 с.
7. *Исследование и численное моделирование ответственных конструкций и грунтов основания объекта «Укрытие» // Отчет по НИР, НИИМБП / Руководитель темы Ю. В. Верюжский.* - Кн. 4: Моделирование напряженно-деформированного состояния строительных конструкций 4-го блока ЧАЭС при запроектной аварии. - Киев, 1996. - 294 с.

Получено 1.04.96

УДК 539.3:624.05

Н. Г. Ищенко, К. И. Анкянец, С. Ю. Фиалко, М. Н. Скуратовский, Н. Ю. Анкянец

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ 4-ГО ЭНЕРГОБЛОКА ЧАЭС ПРИ ЗАПРОЕКТНОЙ АВАРИИ

Работа посвящена моделированию поведения строительных конструкций 4-го энергоблока при аварийном воздействии в начальной стадии запроектной аварии. Рассмотрена одна из возможных версий аварии. Величины аварийных воздействий получены из решения задачи газодинамики. Численное исследование поведения конструкций 4-го энергоблока произведено на основе метода конечных элементов (МКЭ). Для анализа динамической реакции системы на заданную нагрузку применялось численное интегрирование уравнений движения по методу Ньюмарка. Принята приближенная методика определения критериев разрушения для железобетонных конструкций и выполнен анализ результатов расчета.

В настоящей работе представлены некоторые промежуточные результаты комплексных исследований [1, 2] состояния механической структуры объекта «Укрытие» (ОУ) на основе численного моделирования термомеханического поведения его конструкций, начиная от их исходного доаварийного состояния в составе 4-го энергоблока ЧАЭС с учетом аварийных и послеаварийных их превращений до нынешнего состояния в составе ОУ. Исследования выполнялись с целью построения численного аппарата для объектно-ориентированного программно-технического комплекса (ПТК), который выполнял бы в автоматизированном режиме функции адекватной оценки и прогнозирования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций ОУ.

Общая методика численного моделирования с целью создания ПТК разработана в НИИМБП и предложена для реализации руководству ОУ и ЧАЭС в 1994 г. [3]. Она была создана с учетом приобретенного институтом к тому времени опыта участия [4] в предотвращении аварийной ситуации, связанной с возможным обрушением нестабильного узла опирания балок Б1, Б2 у пересечения осей 50 и Ж. Суть этой методики состоит в последовательном переходе с помощью численных методов механики сплошной среды от компьютерных моделей доаварийного НДС конструкций 4-го энергоблока к моделям их поставарийного НДС на момент завершения активной стадии аварии 06.05.86 г. и, далее, к моделям нынешнего (непрерывно изменяющегося в силу протекающих в ОУ деградационных процессов и потому именуемого «текущим») НДС конструкций, составляющих сложившуюся после аварии механическую структуру ОУ.

© Н. Г. Ищенко, К. И. Анкянец, С. Ю. Фиалко, М. Н. Скуратовский, Н. Ю. Анкянец, 1998

51

При этом для определения аварийных воздействий на конструкции 4-го энергоблока численно моделируется термомеханическая стадия аварии, включая процессы локального разрушения конструкций и материалов активной зоны РБМК-1000, а также инициированные ими газодинамические процессы [5]. Для определения послеаварийных воздействий на конструкции уже разрушенного 4-го энергоблока численно моделируются термомеханические процессы послеаварийных событий, включая локализацию последствий аварии, в том числе возведение укрытия в 1986 г., проводившиеся после 1986 г. усиления конструкций, землетрясение 1990 г. и другие события [8], способные оказать влияние на текущее НДС механической структуры ОУ, в которой доминируют конструкции разрушенного 4-го энергоблока.

Основным преимуществом изложенного подхода к исследованию состояния конструкций ОУ, по мнению авторов, является уникальная для условий ОУ достоверность исходных данных. Она определяется тем, что исходные данные для построения первоначальной модели доаварийного НДС конструкций 4-го энергоблока берутся из достаточно полной проектной и исполнительной документации 2-й очереди строительства ЧАЭС, имеющейся в различных архивах [6]. При любом же другом подходе к решению проблемы конструкций объекта исследователь (как показывает опыт не только НИИМБП) сталкивается с непреодолимой в условиях ОУ неполнотой и противоречивостью исходных данных, сводящей к нулю практическую ценность результатов.

Представленные ниже результаты относятся к моделированию процесса аварийного разрушения строительных конструкций 4-го энергоблока, которое является ключевой процедурой реализации общей методики проводимых исследований. Эта процедура имеет циклический характер и включает в себя [7]:

- решение задачи динамики путем интегрирования уравнений движения;
- анализ напряженно-деформированного состояния элементов конструкции и принятие решения о характере и степени их разрушения;
- преобразование расчетной модели объекта исследования и передача начальных и граничных условий из решения предыдущего шага по времени.

Численная модель доаварийного НДС конструкций блока Б построена по достоверным исходным данным методом конечных элементов (МКЭ), реализованным в перемещениях. Выполнено исследование сходимости решений для 3-х вариантов дискретизации исходной конечно-элементной модели [6].

Моделирование динамического поведения конструкций блока при аварийных воздействиях осуществляется в конечно-элементной реализации прямым интегрированием уравнений движения [7]. Для оценки разрушения конструкций в вычислительных процедурах приняты упрощенные критерии прочности железобетона.

В качестве основных воздействий на строительные конструкции приняты статические и аварийные динамические. Статические нагрузки определены от веса строительных конструкций и технологического оборудования. Климатические воздействия из-за их малости не учитывались. На методике определения аварийных динамических нагрузок остановимся несколько детальней.

Динамические нагрузки определяются из решения уравнений газодинамики для пространственно-временной функции, моделирующей распространение волн сжатия.

52

Здесь для наглядности рассмотрен один из простейших пространственно-энергетических эквивалентов аварии реактора, происшедшей 26.04.86 г. Функция пространственного распределения динамической нагрузки в шахте реактора принимается в виде равномерно распределенного давления.

Величину импульсной динамической нагрузки, распределенной в пространстве, таким образом, можно считать ввиду относительной малости объема шахты реактора начальным приближением к истинному значению аварийной нагрузки. Под ее воздействием крышка реактора (схема Е) смещается вверх и сжатый газ из шахты начинает поступать в центральный зал и помещения барабанов-сепараторов [5]. На этой основе моделируется воздействие в виде избыточного импульсного давления на стены и перекрытия центрального зала и помещений барабанов-сепараторов.

Задача определения параметров пространственно-временной функции распределения давления на строительные конструкции решалась при оценке расхода пара в 19,2 кг/с через один разрушенный ТК с помощью конечноразностных методов газодинамики на основе подхода Мак-Кормака [5]. Результаты решения задачи газодинамики получены для исходного давления в шахте реактора 16 атм.. При этом максимальное давление на стены центрального зала достигает 2 атм.

Пространственно-временное распределение давления зависит от порядка и времени разрушения стен и перекрытий. В свою очередь разрушение конструкций зависит от распределения нагрузок. Таким образом, ответ на вопросы: какие нагрузки и в какие моменты времени действовали на строительные конструкции; в каком порядке происходило их разрушение - ищется на основе проведения многовариантных расчетов, что и дает основание называть численным моделированием решение задачи в целом.

Давление, возникшее в центральном зале при разрушении реактора, аппроксимировалось распределенной нагрузкой, приложенной к поверхности стен по осям И, Н и 49. В общем виде вектор нагрузки для модели МКЭ представлялся функцией

$$P(x, y, z, t) = P(x, y, z) \cdot f(t),$$

где $P(x, y, z)$ - вектор, задающий пространственную конфигурацию нагрузки, $f(t)$ - функция, задающая закон изменения нагрузки от времени. График зависимости изменения нагрузки во времени представляет собой двухзвенную ломаную, характеризующую рост нагрузки от 0 до 2 атм. за 0,01 с и дальнейшее ее падение до нуля за 0,2 с.

Конечно-элементная модель [1-3] учитывает все основные несущие стены между осями 42-50 и Д-С, а также главные перекрытия на отметках 9,00, 31,5, 50,0 м. Для

моделирования основных несущих стен блока использовались четырехугольные и треугольные оболочечные элементы типа SHELL. Конструкция полагалась жестко заземленной на отметке 0,00 м. Построенная таким образом модель блока содержит 10326 степеней свободы, 1880 узлов, 2104 элемента.

Для определения напряжений, возникающих в элементах конструкций от собственного веса, использовалась ветвь статического анализа Linear Static программы ROBOT V.6 [9]. Для анализа динамической реакции системы на заданную нагрузку применялось прямое численное интегрирование по методу Ньюмарка, реализованное в ветви Transient Analysis.

53

В качестве первого приближения критериев разрушения приняты формулы СНиП для расчета элементов железобетонных конструкций по прочности. В соответствии со временем проектирования и строительства второй очереди ЧАЭС использован СНиП II-В. 1-62*; для расчета стен применялись формулы (99), (100) из [10].

Предполагая, что разрушение конструкций происходит из-за роста изгибающих моментов при практически неизменной нормальной силе, условие (99) принимается выполняющимся в виде равенства и используется для нахождения положения нейтральной оси, т. е. величины x .

Ввиду того, что данный этап расчета является первым приближением, служащим для отработки методики расчета сооружения в целом, использованы дополнительные упрощения при проверке прочности. К этим упрощениям отнесены следующие: площадь сжатой арматуры и толщина защитного слоя равны нулю, поэтому $h_0 \approx h$. Кроме того, отсутствуют проверки по поперечной силе ввиду отсутствия в расчетной схеме стержневых элементов.

Так как в выполненном расчете результаты представлены в виде напряжений $\sigma_{\max}$ и $\sigma_{\min}$, полученных в предположении упругой работы каждого сечения, формулы (99) и (100), заимствованные из [10], удобно преобразовать, используя зависимости напряжений от усилий.

После соответствующих преобразований формула (100) из [10] приобретает вид

$$2\sigma_{\max} + \sigma_{\min} \leq 3(\sigma_{\max} + \sigma_{\min} + 2\mu R_a) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min} + 2\mu R_a}{4R_u}\right),$$

где μ - коэффициент армирования по растянутой арматуре.

Для бетона М400 $/P_u = 210$ кг/см², для арматуры класса АIII - $R_a = 3400$ кг/см². Для среднего коэффициента армирования $\mu = 0,003$ критерий разрушения приобретает вид

$$\begin{aligned} &2\sigma_{\max} + \sigma_{\min} > \\ &> 3(\sigma_{\max} + \sigma_{\min} + 20,4 \text{ кг / см}^2) \times \\ &\times \left(1 - \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min} + 20,4 \text{ кг / см}^2}{840 \text{ кг / см}^2}\right). \end{aligned}$$

Для плит перекрытий при тех же предположениях критерий прочности имеет более простой вид:

$$\sigma_{\max} \leq 6\mu R_a \cdot \left(1 - \frac{\mu R_a}{2R_u}\right).$$

Для $R_a = 3400$ кг/см², $R_u = 210$ кг/см² и $\mu = 0,005$ критерий разрушения $\sigma_{\max} > 98$ кг/см².

В результате численного моделирования получены картины разрушений в конечной стадии процесса деформирования вплоть до снятия аварийных воздействий. В качестве примера полученных результатов на рис. 1, 2 приведены, соответственно, деформированное и напряженное состояние стены по оси И.

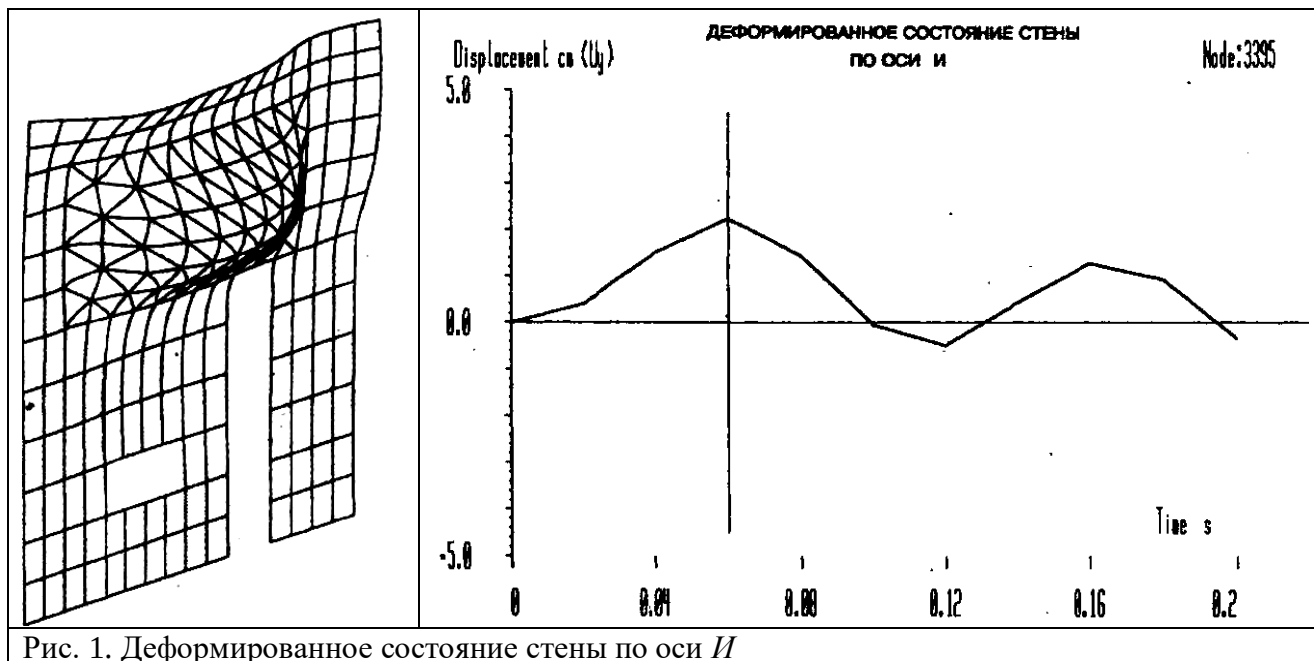


Рис. 1. Деформированное состояние стены по оси II

54

График перемещений характерной точки стены (узел 3395) на рис. 1 соответствует приведенной здесь же картине деформирования в момент времени $t=0,16$ с, который обозначен на графике вертикальной линией. Следует отметить, что точки на дискретной схеме и интервал времени для графиков перемещений выбирались из условия обнаружения разрушающих напряжений. Поэтому они не характеризуют величины перемещений узлов в конечной стадии деформирования

На рис. 2 приведена картина напряженного состояния стены по оси II для того же момента времени $t=0,16$ с, когда реакция системы достигает экстремального значения. Картина отражает распределение нормальных к вертикальным сечениям стены напряжений в ее поверхности со стороны помещения южных барабанов-сепараторов.

Документирование результатов моделирования выполнялось в графическом и табличном виде. Для каждого элемента конструкции (стена, перекрытие) получено визуализированное представление полей компонент тензора напряжений и вектора перемещений.

Визуализированные результаты численного моделирования сопоставлялись с имеющимися материалами натурных обследований конструкций разрушенного 4-го энергоблока. При этом совпадение отдельных, доступных для обследования фрагментов фактической картины разрушений и соответствующих фрагментов численной картины разрушений являлось основным критерием адекватности численного моделирования. Кроме того, полученные численные результаты указывали на наличие в сложившейся механической структуре ОУ как общеизвестных, так и ранее неизвестных разрушений конструкций.

Последующие натурные обследования, целенаправленно выполненные сотрудниками НИИМБП, подтвердили наличие этих, ранее не обнаруженных из-за сложности доступа к ним, разрушений. Тем самым были доказаны и прогностические возможности численного моделирования в отношении НДС конструкций ОУ, а также его эффективность для повышения целенаправленности натурных исследований.

55

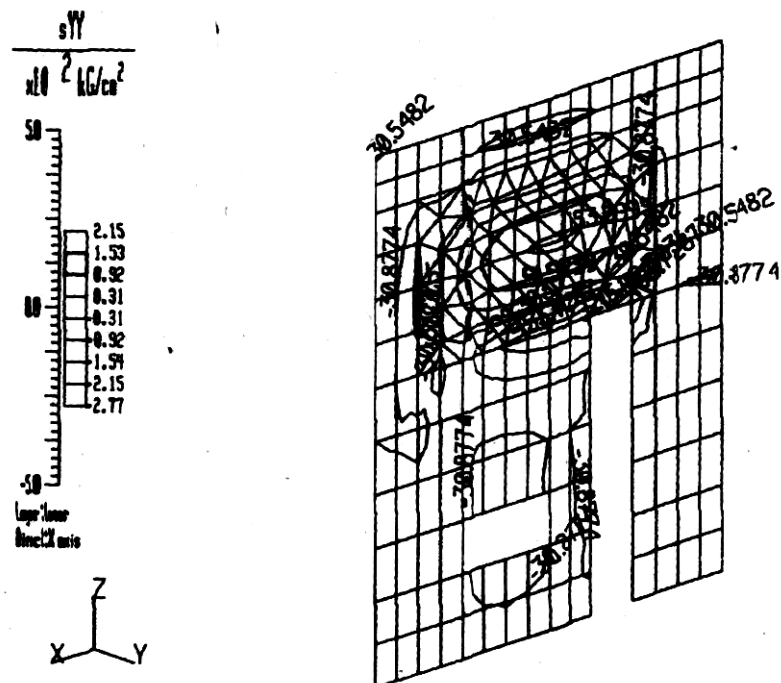


Рис. 2. Картина напряжений в стене по оси II

Результаты численного моделирования позволили обследователям оценить возможные картины состояния конструкций ОУ и определить ожидаемые места их повреждений еще до выходов на блок. Поэтому, заблаговременно подготавливаясь, они действовали оперативно и смогли с минимальной дозовой нагрузкой в высоких гамма-полях впервые за прошедшие после аварии годы обнаружить и зафиксировать на фотографиях разрушения, предсказанные расчетным путем [11]. Укажем некоторые характерные в этом плане разрушения строительных конструкций ОУ, обнаружение которых в натуре стало возможным в результате выполнения работ по численному моделированию аварийного поведения конструкций блока Б.

1. Смещение двух южных барабанов-сепараторов относительно друг друга по горизонтали вдоль собственных продольных осей минимум на 40 см (максимум на 80 см), что свидетельствует о разрешении недоступного для обследования опорного узла на отм. 30,9 м центральной стойки опорной рамы как минимум под одним из барабанов-сепараторов. Критичность этой ситуации вряд ли нуждается в специальном обосновании, если учесть вес самих барабанов-сепараторов и завала, который они несут на себе.

2. Обрушение в осях 45-50 всех плит перекрытия южной барабан-сепараторной с отметкой 50,00 м на магистральные паропроводы. В результате почти вся нагрузка от опалубки у пересеченна осей 50 и Ж передается на сохранившийся монолитный участок этого перекрытия. Опалубка, являющаяся западной опорой южных главных балок Б1 и Б2 покрытия ОУ, имеет консольный вылет 370 см, тогда как консольный вылет участка всего 90 см. Следует отметить при этой, что только вес бетона в опалубке составляет около 700 т.

3. Раздвижка стен южного прочно-плотного бокса (помещение 617/3), на которые опирается перекрытие на отм. 30,9 м. В результате перекрытие, на которое опираются

56

южные барабаны-сепараторы, вышло из зацепления примерно на 30 см как с южной, так и с северной опорной стеной ниже отм. 30,9 м.

4. Полное разрушение в осях 43-44, примерно между отметками 43 м и 53 м, стены по оси II южной вихлопной шахты, являющейся восточной опорой южных главных балок Б1 и Б2 покрытия ОУ.

Полученные результаты исследований безусловно важны для понимания уровня фактически существующей безопасности ОУ, но они являются всего лишь промежуточными. Разработка ПТК и его численного аппарата на сегодня все еще не завершена по независящим

от авторов причинам, хотя эффективность реализуемой методики исследований апробирована практикой, а также признана отечественными и иностранными экспертами.

Завершение этой разработки в полном объеме представляется актуальным еще и потому, что оно будет означать появление информационно верифицированного и нормативно сертифицированного инструмента для научно обоснованного расчетного прогнозирования поведения конструкций ОУ. Опыт показывает, что без такого прогнозирования невозможно принятие значимых для безопасности ОУ решений, как проектных по преобразованию объекта, так и эксплуатационно-управленческих по предотвращению аварийных ситуаций.

Так, несмотря на общепризнанную нестабильность механической структуры ОУ, принятие проектных решений по ее стабилизации затянулось на годы и далеко от завершения. Одна из глубинных причин такого положения кроется в отсутствии объектно-ориентированного аппарата типа ПТК для расчетного обоснования этих решений по принципу «риск - польза».

Что касается решений по эксплуатационному управлению безопасностью ОУ, то с 1994 г., когда был реализован проект предотвращения обрушения аварийного узла опирания балок Б1, Б2 у пересечения осей 50 и Ж, разработанный ВНИПИЭТ на основе исследований НИИМБП [4], до настоящего времени на ОУ не реализован ни один сколь-нибудь значимый для безопасности объекта проект усиления конструкций. И хотя потребность в этом бесспорна, она пока лишь интуитивно осознается, но не обосновывается строго из-за отсутствия расчетного инструментария все того же типа.

В заключение следует отметить, что необходимость работы, кратко освещенной в настоящей публикации, была вызвана практической потребностью в знании текущего НДС как механической структуры ОУ в целом [1], так и отдельных ее элементов [4]. Без такого знания, которое в достаточном объеме и качестве на сегодня еще отсутствует, невозможно обеспечение безопасности объекта «Укрытие» на требуемом уровне.

1. *Дополнительная экспертиза состояния строительных конструкций укрытия аварийного блока ЧАЭС // Отчет по НИР, НИИМБП по договору № 5-МБП от 04.01.94 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Кн. 1-5. - Киев, 1995. - 9 кн.*

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

3. *Дополнительная экспертиза состояния строительных конструкций укрытия аварийного блока ЧАЭС // Отчет по НИР, НИИМБП по договору № 5-МБП от 04.01.94 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Кн. 2: Общая методика экспертирования строительных конструкций 4-го энергоблока ЧАЭС и объекта «Укрытие». - Киев, 1995. - 66 с. - 9 кн.*

4. *Исследование состояния опорных конструкций балок укрытия Б1, Б2 в осях 47-51, Г-Л аварийного блока ЧАЭС // Отчет по НИР, НИИМБП по договору № 14 от 20.05.93 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Кн. Л: Численные исследования напряженно-деформированного состояния опорных конструкций. - Киев, 1993. - 382 с.*

5. *Исследование и численное моделирование надежности ответственных конструкций и грунтов основания объекта «Укрытие» // Отчет по НИР, НИИМБП / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Кн. 2: Моделирование конструкций РБМК 1000 в эксплуатационном режиме и на станции запроектной аварии. - Киев, 1996. - 453 с.*

57

6. *Исследование и численное моделирование надежности ответственных конструкций и грунтов основания объекта «Укрытие» // Отчет по НИР, НИИМБП / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Кн. 3: Построение расчетной модели 4-го энергоблока ЧАЭС для численных исследований - Киев, 1996. - 114 с.*

7. *Исследование и численное моделирование надежности ответственных конструкций и грунтов основания объекта «Укрытие» // Отчет по НИР, НИИМБП / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Кн. 4: Моделирование напряженно-деформированного состояния строительных конструкций 4-го энергоблока ЧАЭС при запроектной аварии. - Киев, 1996. - 294 с.*

8. *Исследование и численное моделирование надежности ответственных конструкций и грунтов основания объекта «Укрытие» // Отчет по НИР, НИИМБП / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Кн. 5: Моделирование напряженно-деформированного состояния строительных конструкций объекта «Укрытие» при сейсмических воздействиях. - Киев, 1996 - 370 с.*

9. *User reference manual for ROBOT V. 6. - Meylan: RoboBAT. -1995. - 348 p.*

10. *СНИП 2.03 01-84 «Бетонные и железобетонные конструкции». - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. - 79 с.*

Получено 11.05.96

УДК 621.039.58+351.354

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 натурных 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

© 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 получаются 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 и т. 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 прогнозирования 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 микроповреждений, макроразрушений и других нормативно недопустимых конструктивных дефектов. Это предопределяет возможность скачкообразного изменения параметров (в частности, хрупкого разрушения) не только вследствие экстремальных воздействий, но и деградиационных 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 деградиационные 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

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 предреконтрукционных 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 усиления 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 завысить 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 определяли выбор основного варианта численного моделирования отказов и переходных процессов, приводящих к изменениям системы [1, 8, 9, 11]. В общем случае система составляется 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. *Аузусти 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

69

УДК 621.039.586

В. Л. Бродовой, Б. П. Иващенко

ПОСТРОЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»

Обсуждаются характерные особенности методики, применяемой при анализе безопасности (оценке риска) объекта «Укрытие», и особенности самого объекта, влияющие на построение такой методики. Формулируются используемые показатели (функции) риска, обсуждается эффективность выбора тех или иных. Характеризуется математическая сторона учета неопределенности параметров объекта «Укрытие» при моделировании аварийных процессов, влияние этой неопределенности на значения функций риска. Приведены некоторые количественные оценки показателей риска объекта «Укрытие» с выводами относительно их качества.

Целью настоящей работы является обсуждение положений и принципов, лежащих в основе построения методики теоретического анализа безопасности объекта «Укрытие». Главным образом рассматриваются вопросы оценки радиационной опасности объекта: выбор соответствующих показателей и процедура их нахождения.

Под теоретическим анализом безопасности, или же оценкой риска будем понимать процесс определения значений некоторых функционалов текущего состояния объекта - функций риска, которые отражают средние ожидаемые негативные воздействия объекта на окружающую среду, население, персонал, имущество и т. д. Эти величины комплексно отражают стохастическую природу аварий и сравнительно детерминированные масштабы их последствий.

Для теоретического подхода к анализу безопасности объекта «Укрытие» (ОУ) за основу были приняты существующие и апробированные на практике методики такого анализа для атомных станций, в частности, созданные специалистами Национальных технических лабораторий в Айдахо (США) [1] и Института атомной энергетики им. Курчатова [2]. Ввиду особенностей ОУ эти методики не могли быть применены в точности в существующем виде, а подвергались модификациям.

Основные направления выработки методики определялись согласно следующим соображениям. Текущие (не экстремальные) процессы в ОУ несравнимы по скорости и мощности с кинетикой ядерного реактора. Эти практически стационарные явления - остаточное тепловыделение, размножение нейтронов в подкритичных топливосодержащих массах (ТСМ), усталостное деформирование строительных конструкций и т. п. - можно полагать устойчивыми «в малом», т. е. при отсутствии инициирующего исходного события, некоторого толчка (например, землетрясение или взрыв) процессы не имеют тенденции быстро развиваться в непредсказуемом направлении от неизбежных малых случайных воздействий. Однако неустойчивость «в большом» имеет место, т. е. именно воздействие некоторого исходного события (сильно изменяющего состояние объекта) вызовет быстрое развитие аварийного, ядерно- либо радиационно-опасного процесса.

Основные процедуры анализа безопасности АЭС (такие, как структурный и функциональный анализ объекта, построение деревьев событий и отказов [1,2, 3]) сохраняют свое значение, но результаты некоторых из них для ОУ значительно проще. Деревья событий

© В. Л. Бродовой, Б. П. Иващенко, 1998

и отказов являются короткими и слабо разветвленными, что позволяет почти сразу проследить влияние того или иного ПИС на отказ конструкций.

Поэтому эволюционные модели, используемые в анализе безопасности атомных станций, ввиду сложности их структуры, в основном для описания отдельных узлов и агрегатов [1], в случае ОУ могут эффективно применяться к структуре в целом. Для этого ОУ рассматривается как система, способная находиться в определенном числе состояний. При стремлении достичь максимальной точности в описании ОУ неизбежен приход к бесконечному числу параметров, описывающих систему, и соответственно к бесконечному числу состояний системы. Но поскольку различия между целыми классами состояний ОУ несущественны для эксплуатации, то для выполнения вероятностного анализа путем расширения границ состояний формируется конечный их список.

Состояния делятся на три группы: *безопасные*, в которых ОУ не оказывает сверхнормативного радиационного воздействия на персонал, население, окружающую среду; *аварийные*, возникающие вследствие явлений, недопустимых в процессе эксплуатации ОУ (пожаров, взрывов, обрушения несущих конструкций, экстремальных климатических и сейсмических событий и т. п.), из-за которых ОУ может потерять свою способность сохранять радиоактивные вещества внутри себя, не допуская выброса; *катастрофические*, в которых ОУ неспособно выполнять свое назначение.

Полный список исходных событий, которые могут инициировать аварийный процесс, организован в соответствии с принципами, рекомендованными МАГАТЭ для анализа безопасности атомных станций [4]; он называется жестким списком постулируемых исходных событий (ПИС) и не приводится здесь из-за его обширности. Характерной особенностью анализа безопасности ОУ является наличие в жестком списке подмножества, которое называется мягким списком. Он связан с временным характером ОУ, а также с большой неопределенностью его структуры и отклика на возможные воздействия. По этим причинам, по сравнению с жестким списком, в мягком отсутствуют события, вероятность возникновения которых в течение ближайшего ориентировочного срока службы

постулируется пренебрежимо малой (например, землетрясение силой 7 баллов). Поскольку критерии малости можно назначать в соответствии с различными требованиями, то вариантов мягкого списка может быть несколько. Один из возможных мягких списков приведен ниже; он составлен в соответствии с концепциями, предложенными в [5].

1. Внешние события:

- 1.1. Землетрясение до 5 баллов.
- 1.2. Экстремальные ветровые нагрузки.
- 1.3. Экстремальные снеговые нагрузки.
- 1.4. Наводнения и ливни.
- 1.5. Аварии на действующих энергоблоках ЧАЭС.

2. Внутренние события:

- 2.1. Пожар внутри ОУ.
- 2.2. Падение конструкций объекта «Укрытие» по деградиционным причинам.
- 2.3. Возникновение СЦР.
- 2.4. Перемещение схемы Е.
- 2.5. Подъем мелкодисперсной пыли.

71

- 2.6. Падение тяжелого оборудования и конструкций при монтаже и сборке.
- 2.7. Различные внутренние исходные события техногенного характера.

Из-за стохастического характера постулируемых исходных событий существование и эволюция ОУ во времени является случайным процессом. Эффективным шагом является приписывание эволюции ОУ во времени марковского свойства [6]. Естественное предположение о том, что любое из принятых к рассмотрению состояний системы возникает в результате конечной последовательности природных и техногенных событий, а также реакции персонала, приводит к возможности расширить список состояний так, чтобы эволюция ОУ однозначно обладала марковским свойством.

Для формулировки вероятностных прогнозов на промежутки времени порядка нескольких лет нет необходимости оперировать непрерывным временем, а достаточно приписать процессу марковское свойство в дискретные моменты времени, кратные году. Такая вероятностная модель является полумарковским процессом. Причем, поскольку пределы, в которых какой-либо набор состояний ОУ считается одним и тем же состоянием, достаточно широки, а расстояние между моментами времени, в которые процесс обладает марковским свойством, может быть выбрано намного большим, чем характерное время протекания аварии, то состояние процесса между двумя моментами перехода может считаться постоянным. Таким образом, модель эволюции ОУ сведена к марковской цепи с конечным числом состояний.

Марковская цепь определяется заданием переходных вероятностей [6], источниками оценки которых служат нормативные документы, относящиеся к частотам постулируемых исходных событий, и статистическая обработка данных по климатическим и техногенным событиям в районе ОУ, а также моделирование развития последствий того или иного исходного события, анализ существующих систем безопасности. Поскольку оценены переходные вероятности и построены переходные операторы марковской цепи, дальнейший вероятностный анализ сводится к матричным преобразованиям [6]. Так оцениваются следующие вероятностные показатели надежности ОУ:

Вероятность возникновения аварийных и катастрофических состояний в течение определенного ближайшего срока (N лет), и соответственно вероятность просуществовать этот срок в безопасных состояниях. Зависимости этих вероятностей от времени - это функции вероятностей в смысле строгих определений [6]. Без указания срока или при отсутствии зависимости от времени подобные вероятности не имеют смысла, и к ним даже не применим термин «вероятность» в аксиоматическом понимании;

Среднее время до попадания в аварийные (катастрофические) состояния и дисперсия этого времени. Эту величину можно считать прогнозом долговечности системы, хотя, как правило, ее дисперсия велика, и поэтому прогноз малоинформативен и сильно чувствителен к неточности исходных данных.

Чтобы ответить на вопрос: эффективны ли предпринимаемые меры по повышению уровня надежности ОУ, в переходных операторах марковской цепи отражают изменение переходных вероятностей событий, подверженных детерминированному вмешательству человека. Это продлевается с использованием адаптивных алгоритмов наблюдения [7, 8], обеспечивающих интервальную оценку требуемых переходных вероятностей.

72

Поскольку получены требуемые оценки, опять анализируются глобальные вероятностные характеристики процесса эволюции ОУ для новых переходных операторов, которые сравниваются с прежними показателями. Таким образом, в рамках вероятностной модели получают ответ на поставленный вопрос.

Анализ поведения эволюционной модели ОУ естественным образом составляет два первых этапа в анализе гипотетических аварийных сценариев по следующей схеме:

оценка вероятностей исходных событий; развитие аварийной ситуации в результате ПИС; оценка возможности возникновения ядерно-опасной ситуации (СЦР);

оценка объемов выброса радиоактивных веществ за пределы ОУ; оценка значений выбранных функций риска.

Следующие соображения определяют выбор функций риска. Для населения ОУ представляет собой радиационную опасность; ее масштабы дают основание заключить, что основными негативными последствиями радиоактивного загрязнения являются стохастические соматические эффекты - летальные исходы заболеваний [3]. Однако вполне логичный выбор числа потенциальных летальных исходов в качестве функций риска ОУ порождает значительные трудности для практического анализа. Для получения обоснованной оценки смертности за некоторый срок следует изучить корреляции между возникновением аварийной ситуации и радиоактивным выбросом в окружающую среду, между выбросом и загрязнением биогеоценозов, между загрязнением и дозой внешнего и внутреннего облучения человека, между дозой и заболеваемостью, между заболеваемостью и смертностью. Каждая из этих задач является нетривиальной и нерешенной в своей области знания, что почти сводит на нет возможность достоверной оценки смертности в настоящее время. Аналогичная ситуация наблюдается при выборе в качестве функции риска величины коллективной дозы, получаемой населением в результате гипотетической аварии.

Однако реально достижимым является решение задачи о корреляции между возникновением аварийных ситуаций и объемом радиоактивного выброса в атмосферу и водную среду. Поэтому в работах [3, 9] в качестве функции риска постулируемых исходных событий принимались величины:

$$F_k = p\{E_k\} \cdot S_k, \quad k = \overline{1, N}, \quad (1)$$

E_k и $p\{E_k\}$ - отдельное постулируемое исходное событие и его вероятность, S_k - функция негативных последствий, а именно суммарная активность радиоактивных веществ, покидающих ОУ в результате развития последствий этого события. Таким образом, функция риска F_k отражает средние, ожидаемые за некоторый период радиационные последствия исходных событий.

В то время как стохастический множитель $p\{E_k\}$ в функции риска (1) оценивается из описанного выше расчета марковской цепи, для определения детерминированного множителя S_k привлекаются математические модели гипотетических аварийных процессов, наблюдающиеся в случае реализации постулируемого исходного события. Анализ динамических систем, в которых протекают такие процессы, представляет собой нетривиальную проблему в связи со следующим обстоятельством.

73

Специфика ОУ делает параметры физических процессов неопределенными. Поэтому особенно актуален вопрос: когда традиционно полученная путем усреднения неопределенных параметров модель физического процесса отображает этот процесс в целом с приемлемой для инженера точностью? Корректность и устойчивость математической модели далеко не всегда анализируются исследователями, а без такого анализа невозможно гарантировать близость модельного расчета к действительному явлению. Учитывая потенциальную опасность экстремальных процессов в ОУ и то место, которое занимает

математическое моделирование в теоретическом исследовании вопросов его безопасности, можно утверждать, что важность проблемы устойчивости математических моделей выходит далеко за рамки чистой теории.

Широкий круг процессов (динамика и статика строительных конструкций, теплопроводность, конвекция и диффузия в водно-коллоидных средах внутри ОУ, размножение нейтронов в ТСМ) описывается квазилинейными системами с локальным взаимодействием:

$$\lambda_k \Delta^* u_k + F_k(t, x, u, \alpha) = \frac{du_k}{dt}, \quad x \in V, t \geq 0, \quad (2)$$

$$I_k^0(u, x, \rho) = 0, \quad x \in V, t = 0, \quad (3)$$

$$B_k(t, x, u, (L \cdot n) u, \beta) = 0, \quad k = \overline{1, N}, \quad x \in \partial V, t \geq 0. \quad (4)$$

Здесь Δ^* - линейный дифференциальный оператор 2-го порядка (Лапласа, Навье и т. п.), L - линейный дифференциальный оператор 1-го порядка («оператор потока»), d/dt - обычная, частная или субстанциональная производная по времени; параметры α, β, ρ , вполне определяют параметры самовозбуждения и внешнего влияния, так что аналитический вид функции F_k, I_k^0, B_k зависит только от физической сути процесса; $u = (u_1, \dots, u_N) = u(t, x)$ - совокупность динамических переменных, которые описывают состояние системы, и являются функциями пространственных координат $x = (x, y, z) \in V \subset R^3$ и времени t ; ∂V - граница пространственной области V . Принятие начальных (3) и граничных (4) условий в нетрадиционном виде связано с тем, что параметры измеряются и наблюдаются не непосредственно, и погрешность косвенного наблюдения является одним из факторов неопределенности. Так, в [3] отмечается, что места залегания ТСМ устанавливаются такими косвенными способами наблюдений: ультразвуковым, радиолокационным, интенсивным тепловыделением, и нейтронные потоки контролируются системами «Шатер» и «Финиш», перемещения ответственных конструкций измеряются тензодатчиками и т. п.

Примем, что параметры $\lambda_k, \alpha, \beta, \rho$ имеют малую погрешность и в задаче (2)-(4) они усреднены тем или иным способом. Тогда по пространственно-временной области определения динамических переменных u наблюдается «микронеопределенность», т. е. малые отклонения $\delta \lambda_k, \delta \alpha, \delta \beta, \delta \rho$ от усредненных значений. Вследствие этого решение усредненной задачи (2)-(4) u отклоняется от реального u_r на величину $v = u_r - u$. Речь идет о корректно поставленных задачах, в которых решение непрерывно зависит от условий задачи. Поэтому v принимается малым; при этом отмечается, что линеаризованные соотношения для v строятся с целью установления тенденции поведения v .

Проблема состоит в том: представляет ли решение u усредненной задачи (2)-(4) исследуемое явление с приемлемой точностью, или же «микронеопределенность»

74

далеко «уводит» усредненную задачу от действительности, а для того, чтобы достичь требуемую малость погрешности, нужно было бы зафиксировать условия задачи с нереальной точностью. Поставленная проблема - это инженерный аналог вопроса об устойчивости движения механической системы и вопроса корректности математической модели.

Тенденция расхождения решений определяется поведением возмущенного решения $u + v$, которое удовлетворяет задаче (2)-(4) с возмущенными параметрами $\lambda_k + \delta \lambda_k, \alpha + \delta \alpha, \rho + \delta \rho$. Ввиду априорной малости возмущений задача позволяет следующую линеаризацию:

$$\lambda_k \Delta^* v_k + \sum_m f_{km} v_m + \delta g_k = \frac{dv_k}{dt}, \quad (5)$$

$$v_k(0, x) = \delta v_k^0(x), \quad k = \overline{1, N}, \quad (6)$$

$$(L \cdot n)v + Kv = \delta \psi + \delta \phi, \quad x \in \partial V, \quad (7)$$

где введены обозначения

$$f_{km} = \frac{\partial F_k}{\partial u_m}, \quad \delta g_k = \left[\delta \lambda_k \Delta^* u_k + \sum_m \frac{\partial F_k}{\partial \alpha_m} \delta \alpha_m \right], \quad K = \left(\frac{DB}{Dp} \right)^{-1} \frac{DB}{Du},$$

$$\delta \psi = -(L \cdot \delta n)u, \quad \delta \varphi = -\left(\frac{DB}{Dp} \right)^{-1} \frac{DB}{D\beta} \delta \beta, \quad p = (L \cdot n)u,$$

$$\delta v_k^0 \cdot \sum_m \left[\frac{\partial I_k^0}{\partial u_m} \delta v_m^0 + \frac{\partial I_k^0}{\partial p_m} \delta p_m \right] = 0.$$

Решим системы (5)-(7) в виде разложения по собственным функциям:

$$v(t, x) =$$

$$= v_b(t, x) + \sum_{k=0}^{\infty} W^{(k)} e^{\mu_k t} \int_V W(k) \cdot \left[\delta v^0(x) - v_b(0, x) + \int_0^t e^{-\mu_k \tau} \left(\delta g - \frac{\partial v_b}{\partial \tau} \right) d\tau \right] dV. \quad (8)$$

Здесь μ_k - собственные значения линеаризованной системы, $\bar{W}^{(k)}$ - ортонормальные собственные функции, $v_b(t, x)$ - решение квазистационарной задачи:

$$(L \cdot n)v + Kv = \delta \psi + \delta \varphi, \quad x \in \partial V, \quad (10)$$

$$\lambda_k \Delta^* v_k + \sum_m f_{km} v_m = 0, \quad x \in V, \quad (9)$$

которое показывает, что тенденция развития погрешности v во времени определяется знаками действительных частей чисел Ляпунова μ_k , тогда как градиенты собственных форм $W^{(k)}$ определяют тенденцию влияния граничных условий и характеристик среды.

Статические и динамические расчеты строительных конструкций (на собственный вес, снег, землетрясение, удар самолета и т. д. [3]) ввиду их численной (конечно-элементной и т. п.) реализации производятся для точечных (не континуальных) моделей,

75

в которых $u = u(t)$, $v = v(t)$ имеют большую размерность (до нескольких тысяч точек). В такой постановке возмущение физических параметров и начальных условий относительно равномерно сказывается на всем векторе u ; возмущение граничных условий непосредственно изменяет часть элементов u , а на остальные влияют внутренние свойства устойчивости. Во многих инженерных задачах, связанных с «Укрытием», решение u устойчиво, процесс, как правило, затухает: радиоактивный распад, нейтронные и температурные поля при глубокой подкритичности ТСМ и интенсивном принудительном охлаждении и т. п., что позволяет исследователям произвольно выбирать усредненные параметры, и несмотря на это получать результат с малой погрешностью. Как правило, хорошо работает принцип консервативности - выбора наихудших возможных параметров. Но эффекты неопределенности параметров могут иметь и неожиданные последствия. Можно привести такие качественные примеры.

Учитывая, что железобетонные и стальные конструкции ОУ вследствие климатических, радиационных и других влияний стареют, характеризуясь неопределенностью упругих характеристик и условиями закрепления, сниженными свойствами жесткости по сравнению с нормативными (справочными), последние принимаются к динамическому расчету с эмпирическими коэффициентами ослабления, меньшими единицы. При этом можно неявно предположить, что рассчитанные поля напряжений и перемещений будут являться консервативной оценкой - оценкой сверху. Однако могут наблюдаться и более сложные случаи. Вследствие большого количества микротрещин параметры жесткости c_i могут микроскопически изменяться в процессе прохождения упругих волн. В случае достаточно прочного материала эти малые отклонения не имеют тенденции к накоплению и исчезают в равновесном состоянии, т. е. зависят однородно от амплитуд волн. Придавая параметрам жесткости малые возмущения такого характера, получаем, что в модели (5)-(7) величины δg , $\delta \varphi$, $\delta \psi$, $\{f_{km}\}$ приобретают периодический характер с малой глубиной пульсаций. Частоты пульсации линеаризованных параметров точно отвечают собственным частотам системы (2), которые являются усредненными значениями частот системы (5). Это значит, что погрешность v будет

возрастать в режиме суперпозиции как обычного, так и параметрического резонанса. Амплитуда погрешности за время действия динамической нагрузки возрастает в экспоненциальном режиме. Правда, в материалах, значительно ослабленных большой концентрацией микротрещин, более вероятным является механизм накопления усталости после прохождения волн; тогда параметры жесткости монотонно ухудшаются. В этом случае вместо экспоненциального (резонансного) возрастания ошибки будут увеличиваться в линейном (дивергентном) режиме.

Рассмотрим еще один пример, относящийся к возможности бифуркации температурных полей в ТСМ. Оценки температурных полей остаточного тепловыделения в подкритичных ТСМ базируются на многочисленных предположениях, поскольку достоверно не известны ни условия теплообмена, ни геометрия ТСМ, ни скорость (3-распада. При плохих условиях теплообмена, которые могут быть в глубине завалов, фактическое поле температур может отличаться от расчетного на конечные, а не малые, величины, т. е. в выражении (10) при $\|K\| \rightarrow 0$ может произойти бифуркация. Другими словами, станет

76

возможным как малое по норме решение v_b , так и большое, но слабо меняющееся в пространстве и времени решение V_b , для которого поток $(L \cdot n)V_b$ мал вследствие относительной равномерности поля и плохих условий теплообмена, а KV_b мало из-за малости нормы K . Обнаружить эту бифуркацию можно лишь принимая к линеаризации уточненную (квазилинейную) постановку задачи теплопроводности.

Причиной, по которой такие эффекты исключаются из рассмотрения при анализе безопасности, является не просто их недетерминированность, а и затрудненность конструктивной вероятностной оценки. Иначе говоря, по крайней мере при «мягком» анализе безопасности [3] такого рода эффекты не учитываются. Однако это может привести к резким расхождениям в модельных и натурных исследованиях. Просматривается общая закономерность: возможность такого расхождения возникает там, где в модели происходит пренебрежение малыми нелинейностями.

Анализ устойчивости существенно нелинейных моделей приобрел в последнее время многочисленные приложения. В частности, к исследованиям кинетики ядерных реакторов широко применяются методы нелинейного функционального анализа [10] и теория бифуркаций в динамических системах [11]. Основные теоретические положения вследствие их общности переносятся также и на динамику процессов в объекте «Укрытие». Для численного анализа эффективно использовать вариационные формулировки, на основе которых строятся вариационно-сеточные (конечно-элементные) схемы. Вектор-функция $u(t, x)$, описывающая физический процесс, который можно смоделировать дифференциальной начально-краевой задачей с ограниченной вариацией коэффициентов, минимизирует некоторый терминально-интегральный нелинейный и неквадратичный функционал:

$$\begin{aligned} \Phi(u, \alpha) = & \int_{t_1}^{t_2} \left[\int_V \Psi_V(t, x, u, \alpha) dV + \int_{\partial V} \Psi_{\partial}(t, x, u, \alpha) d(\partial V) \right] dt + \\ & + \int_V \Omega_V(t_1, t_2, x, u, \alpha) dV + \int_{\partial V} \Omega_{\partial}(t_1, t_2, x, u, \alpha) d(\partial V). \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь α обозначает всю совокупность параметров, которые определяют среду, параметры самовозбуждения и внешнего влияния; подынтегральные функции, как правило, включают в себя дифференциальные операторы 1-го или более высоких порядков. Необходимое условие экстремума $\delta\Phi(u, \alpha) = 0$ должно выполняться для всех малых вариаций решения δu , в том числе и для тех, которые вызваны малыми вариациями параметров $\delta\alpha$:

$$\Phi'_\alpha \delta\alpha + \Phi'_u \delta u = 0 \quad (12)$$

(сильные (по Фреше) производные функционала также представляют собой терминально-интегральные функционалы). Вариация δu является зависимой. На основании соотношения (12) потерю устойчивости модели можно трактовать с общих позиций как утрату оператором Φ'_α свойств ограниченности. Последняя гарантирована, например, в задачах строительной механики только для задач из класса Сен-Венана; при этом в ОУ текущее состояние многих

конструкций выводит их из данного класса. При ограниченном операторе Φ'_u и неограниченном Φ'_a гарантирована неустойчивость. Сюда входит потеря устойчивости

77

вследствие как превышения внешним влиянием некоторого уровня, так и возмущения параметров среды. Известны такие частные случаи, как потеря устойчивости форм равновесия конструкций или возникновение самоподдерживающейся цепной реакции.

Отсюда видно, что в условиях, когда приходится рассчитывать потенциальный аварийный процесс с экстремальными параметрами, любое упрощение должно быть хорошо обосновано, хотя такое обоснование иногда не проще расчета неупрощенной модели. Поэтому ответом в модельной задаче всегда является та числовая характеристика, которая полностью описывает негативную сущность процесса, и при этом не слишком чувствительна по крайней мере к тем погрешностям, о которых шла речь.

Так, модельный расчет показал [9], что обрушение кровли ОУ, которое является главным видом функционального отказа, вызовет выход в атмосферу примерно 2 т радиоактивной пыли с суммарной активностью около 2600 Ки. Различные сценарии и причины обрушения, а также сопутствующие природные и техногенные явления уменьшают либо увеличивают эту оценку. Нахождение этой величины завершает расчет функций риска, поскольку определяет детерминированный множитель S_k в функциях риска (1).

Определенные из расчета функции риска имеют следующие характерные особенности в своем поведении.

При малой (порядка 10^{-3} - 10^{-4}) оценке вероятности возникновения ПИС неточность исходных данных, используемых для анализа аварийных последствий, слабо влияет на погрешность окончательной оценки функции риска. Среди таких событий сильное (6-7 баллов) землетрясение с функцией риска 0,26-0,30 Ки/год и оценкой вероятности около 1 раза в 10000 лет, падение летательного аппарата, взрыв вне ОУ, ураган и наводнение с функциями риска в пределах 0,001-0,003 Ки/год, смерч и взрыв внутри ОУ с функциями риска около 0,04 Ки/год.

При большой (от 0,05-0,1) оценке вероятности возникновения ПИС неточность исходных данных приводит к большому разбросу окончательных оценок функций риска, так что они приобретают в значительной мере экспертный характер, хотя и отражают в должной степени большую опасность этой группы исходных событий. Таковы обрушение ОУ по деградиационным причинам, вероятность которого по различным оценкам [3] составляет от 0,08 до 0,1 с функцией риска в пределах от 200 до 260 Ки/год, и пожар внутри ОУ, механизм и объем выноса радиоактивных веществ, при котором еще не выяснено окончательно, так же, как и влияние пожара, на вероятность обрушения ОУ. С начала существования ОУ было зафиксировано четыре пожара [3], что делает данное исходное событие самым вероятным. В [3, 9] приводится оценка функции риска пожара в пределах 0,5-1 Ки/год.

Итак, было показано, что проблематика теоретического анализа безопасности включает в себя вопросы модификации нормативных методик для АЭС с целью выработать методику оценки риска ОУ. Для этого привлекаются эволюционные модели объекта, опирающиеся на прикладные аспекты теории случайных процессов. Неопределенность параметров, характерная для ОУ, делает актуальной частью расчета рисков анализ качественного Поведения математических моделей физических процессов. В связи с этим рациональный выбор функций риска в равной степени опирается и на соображения полноты описания последствий гипотетических аварий, и на соображения возможности

78

конструктивной оценки значений этих функций с тем, чтобы их использование в процессе принятия проектных решений было действительно продуктивным и демонстрировало бы результативность проводимого теоретического анализа безопасности.

1. *Probabilistic Risk Assessment: Applications for Nuclear Reactor Inspection* // D. J. Kelly, T. J. Leahy etc. - 1992, Idaho National Engineering Laboratories, Idaho Falls, ID. - Prep. for the U. S. Nuclear Regulatory Commission under DOE contract No. DE-AC07-76ID01570. - 280 p.

2. *Швыряев Ю. В. и др. Вероятностный анализ безопасности атомных станций. Методика выполнения.* - М.: ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1992. - 266 с.

3. *Отчет по безопасности (оценка рисков) 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.*
4. *Учет чрезвычайных ситуаций, возникающих в результате деятельности человека, при выборе площадок для атомных электростанций // Руководство по безопасности. № 50-SG-S5. - Вена: МАГАТЭ, 1983. - 230 с.*
5. *Исходная техническая информация по проблеме блока № 4 Чернобыльской АЭС для Комиссии Европейского Союза (КЕС). - МНТЦ - ПО ЧАЭС - НИИСК. - Чернобыль-Киев, 1995.*
6. *Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. В 2-х т. - М.: Мир, 1984. - Т. 1. - 527 с.*
7. *Бакан Г. М., Одинцова Е. А. Наблюдатель для одного класса линейных систем, обеспечивающий получение точечной и множественной оценок состояния // Автоматика и телемеханика. - 1986. - № 5. - С. 162-165.*
8. *Бакан Г. М. Фильтрация в условиях нестатистически заданной неопределенности // Автоматика. - 1980. - № 2. - С. 13-21.*
9. *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. - 380 с. - 14 кн.*
10. *Крянев А. В., Шихов С. Б. Вопросы математической теории реакторов: нелинейный анализ. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 279 с.*
11. *Горяченко В. Д. и др. Исследование динамики ядерных реакторов качественными методами. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 166 с.*

Получено 11.04.96

УДК 624.05:539.3

А. В. Шимановский, Н. А. Сирота, М. В. Герасимова
**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ БАЛОК Б1, Б2
ПОКРЫТИЯ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ» В ОСЯХ 50-Ж**

Представлены результаты численного исследования напряженно-деформированного состояния опорных конструкций балок Б1, Б2 покрытия объекта «Укрытие», расположенных на пересечении осей 50-Ж.

Конструктивная схема объекта с учетом имеющихся разрушений восстановлена на основе данных архивных изысканий и натурных обследований доступных конструкций. Показано, что конструктивная схема должна включать в себя не только непосредственные опорные конструкции балок Б1 и Б2, но и завал из рухнувших конструкций и сыпучих материалов, барабаны-сепараторы, а также нижележащие стены и перекрытия блока «Б».

С учетом конструктивной схемы реализована конечно-элементная модель узла опирания балок. Расчеты проведены для различных основных и особмх сочетаний нагрузок. На основе анализа полученных результатов выявлены наиболее опасные сочетания нагрузок и воздействий и наиболее нагруженные зоны сооружения.

Безопасность объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС на протяжении всего времени его существования постоянно привлекает повышенное внимание. Известно, что данный

© А. В. Шимановский, Н. А. Сирота, М. В. Герасимова, 1998

79

объект возведен на разрушенных запроектной аварией реактора конструкциях блока «Б», состояние которых и характер разрушения не выяснены детально до настоящего времени по ряду объективных причин. При этом указанные данные являются необходимыми не только для осуществления технической эксплуатации объекта «Укрытие», но также для его локальных усиления и последующей стабилизации; получить их можно с помощью двух, дополняющих друг друга, способов:

натурным обследованием конструкций;

численным исследованием конструкций при различных, сочетаниях нагрузок и воздействий с выявлением особенностей их состояния и деформирования вплоть до разрушения.

Первый способ не всегда может быть реализован из-за недоступности ряда конструкций вследствие сложной радиационной обстановки в некоторых помещениях объекта. Второй способ позволяет получить необходимые данные без опасности облучения технического персонала при условии точной формулировки исходной задачи. Наилучший

результат дает одновременное применение обоих способов, когда при численном исследовании используются данные натурного обследования доступных конструкций. Это позволяет существенно повысить точность и достоверность конечных результатов.

Именно такой общий подход был применен при численном исследовании опорных конструкций балок Б1, Б2 покрытия объекта «Укрытие», когда была обнаружена подвижка их западной опоры.

Конструктивная схема указанных конструкций в представленной работе построена по данным натурных обследований доступных конструкций объекта «Укрытие» [1]. Анализ материалов показал, что для определения действительного характера процессов, приведших к подвижке западной опоры балок Б1, Б2 по оси Ж, конструктивная схема должна включать в себя не только непосредственные опорные конструкции (так называемую опалубку), но и завал из рухнувших конструкций и сыпучих материалов, барабаны-сепараторы, а также нижележащие стены и перекрытия блока «Б». Кроме этого, при построении конструктивной схемы необходимо учесть:

- примыкающий к стене по оси 50 монолитный участок рухнувшего перекрытия на отметке +50,0 м, на который в значительной степени передается нагрузка расположенной выше опалубки;

- пароводяную арматуру барабанов-сепараторов, которая служит опорой для лежащего выше завала из строительных конструкций и сыпучих материалов;

- сквозной разлом между стенами, расположенными по оси 50 и между осями И-(Д-Е), который тянется от отметки +31,5 м до отметки +50,0 м;

- отклонение от вертикали части стены по оси 50, находящейся выше отметки +50,0 м.

Таким образом, конструктивная схема западного узла опирания балок Б1, Б2 по оси Ж покрытия объекта «Укрытие» представляет собой блок конструкций в осях 47-51 и Г-Л между отметками +10,0 и 66,5 м, являющийся с учетом относительной симметрии блока «Б» его 1/4 частью. Конечно-элементная модель опорных конструкций также была принята симметричной относительно как оси Л, так и оси 47.

Общий вид конечно-элементной модели западных опорных конструкций балок Б1, Б2 по оси Ж покрытия объекта «Укрытие» представлен на рис. 1.

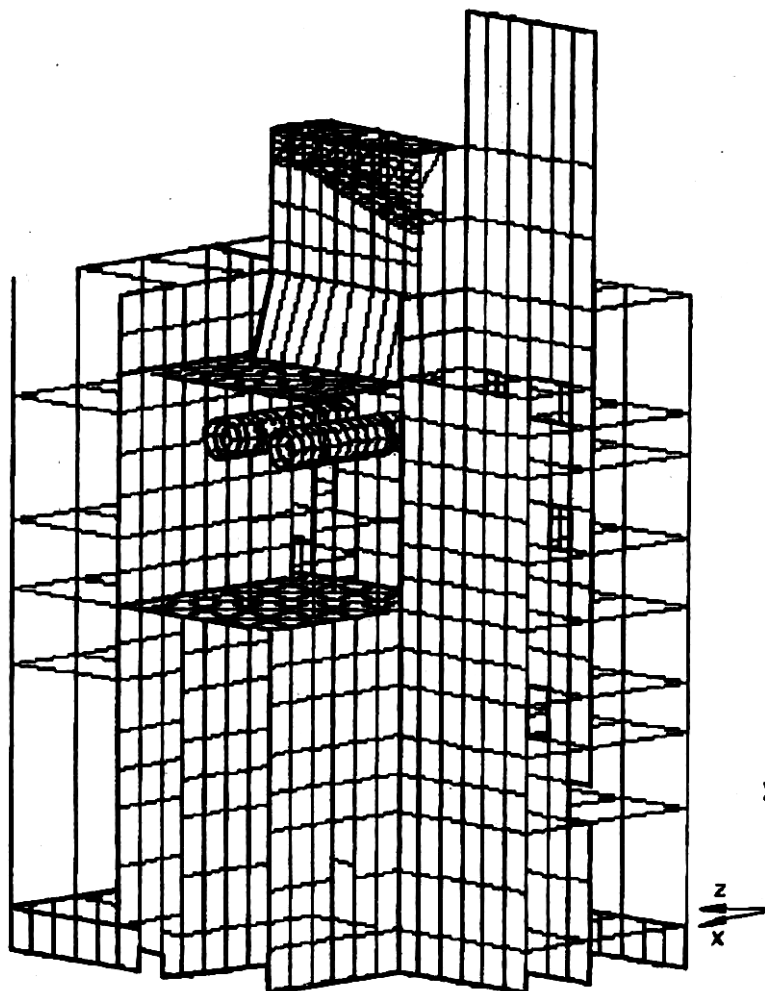


Рис. 1. Конечно-элементная модель западных опорных конструкций балок Б1, Б2.

С конструктивной точки зрения этот блок представляет собой комбинированную систему, включающую в себя элементы различной мерности и жесткости (стержни, оболочки и массивы) весьма сложной пространственной конфигурации. Последнее ведет к необходимости применения при моделировании его структуры конечных элементов различных типов. Поэтому стены и перекрытия блока «Б» аппроксимировались оболочечными элементами, толщина которых соответствует реальной толщине стен и перекрытий. В реализованной модели учтен разлом на стыке двух стен, расположенных по оси 50 и между осями И-(Д-Е), от отметки +31,5 м до отметки +50,0 м, а также отклоненное положение части стены по оси 50 выше отметки +50,0 м.

Бараны-сепараторы также аппроксимированы оболочечными конечными элементами, а для описания их опорных конструкций и элементов пароводяной арматуры использованы сжато-растянуто-изогнутые стержневые конечные элементы. Условия опирания опорных конструкций барабанов-сепараторов к плите перекрытия на отметке +31,5 м соответствуют проектным.

Завал из рухнувших плит перекрытия, находившегося первоначально на отметке +50,0 м, и сыпучих материалов засыпки шахты реактора моделировался комбинацией из

81

оболочечных и объемных конечных элементов. Между завалом и уцелевшими стенами блока «Б», расположенными вдоль оси И и между осями Д-Е, оставлен зазор, реализующий реальные условия проскальзывания соприкасающихся поверхностей. При построении конечно-элементной модели учтено наличие в стене по оси 50 на отметке +50,0 м монолитного участка, т. е. оставшейся в проектном положении монолитной части рухнувшего перекрытия.

Стержни опалубки, представляющие собой стандартные реальные профили, описаны сжато-растянуто-изогнутыми стержневыми конечными элементами, а массив бетона внутри опалубки - объемными конечными элементами. Нанесенная на данную конструкцию сеть конечных элементов содержит 1864 узла и 2006 конечных элементов.

Модуль упругости материала стен, перекрытий и массива бетона внутри опалубки принят $E_1=2,4 \cdot 10^4$ МПа, завала из рухнувших конструкций и сыпучих засыпных материалов – $E_2=2,4 \cdot 10^3$ МПа, а барабанов-сепараторов и стержней опалубки - $E_3=2,1 \cdot 10^5$ МПа. При этом в первых двух случаях коэффициент Пуассона $\mu=0,28$, а в последнем - $\mu=0,3$.

Граничные условия реализованной конечно-элементной модели опорных конструкций приняты в виде полного защемления нижней грани стеновых конструкций, что в пределах принятых расчетных предпосылок соответствует реальным условиям опирания. Кроме того, по осям симметрии конечно-элементной модели наложены связи на перемещения узлов, соответствующие принятым условиям симметрии.

По верхнему обрезу опалубки в местах опирания балок Б1, Б2 приложены приведенные сосредоточенные силы, моделирующие опорные реакции балок при различных нагрузках. Их величины определены в работе [2].

Анализ результатов расчетов. Расчеты описанной выше конечно-элементной модели опорных конструкций балок Б1, Б2 были проведены для ряда основных и особых сочетаний нагрузок [2]. Как показал анализ данных, в численной модели опорных конструкций балок Б1, Б2 в осях 47-51, Г-Л между отметками +10,0 и +66,5 м имеется наиболее нагруженная зона, располагающаяся в осях 47-50, И-(Д-Е) между отметками +31,5 и +58,5 м. Детальное изучение работы указанной зоны позволило заключить, что в ней есть два участка, напряжения в которых относительно других элементов конструкции рассматриваемого сооружения достигают больших значений. Этими участками являются:

- 1) элементы конструкции стены по оси 50, а также элементы конструкций стен, расположенных вдоль оси И и между осями Д и Е на отметке +50,0 м, к которым примыкает оставшаяся в проектном положении уцелевшая монолитная часть перекрытия, лежащего в настоящее время на пароводяной арматуре барабанов-сепараторов;
- 2) элементы стоек поперечных рам опалубки.

Согласно анализу расчетных данных, наиболее опасным сочетанием нагрузок и воздействий является сочетание, включающее в себя собственный вес конструктивных элементов укрытия четвертого блока, вес снега, кратковременное температурное воздействие в холодное время года и сейсмическую нагрузку. Величины напряжений σ_y , возникающих в конечно-элементной модели опорных конструкций при этом нагружении, приведены на рис. 2. В элементах конструкции стены по оси 50, а также в элементах конструкций стен, расположенных вдоль оси И и между осями Д и Е на отметке +50,0 м, наблюдаются

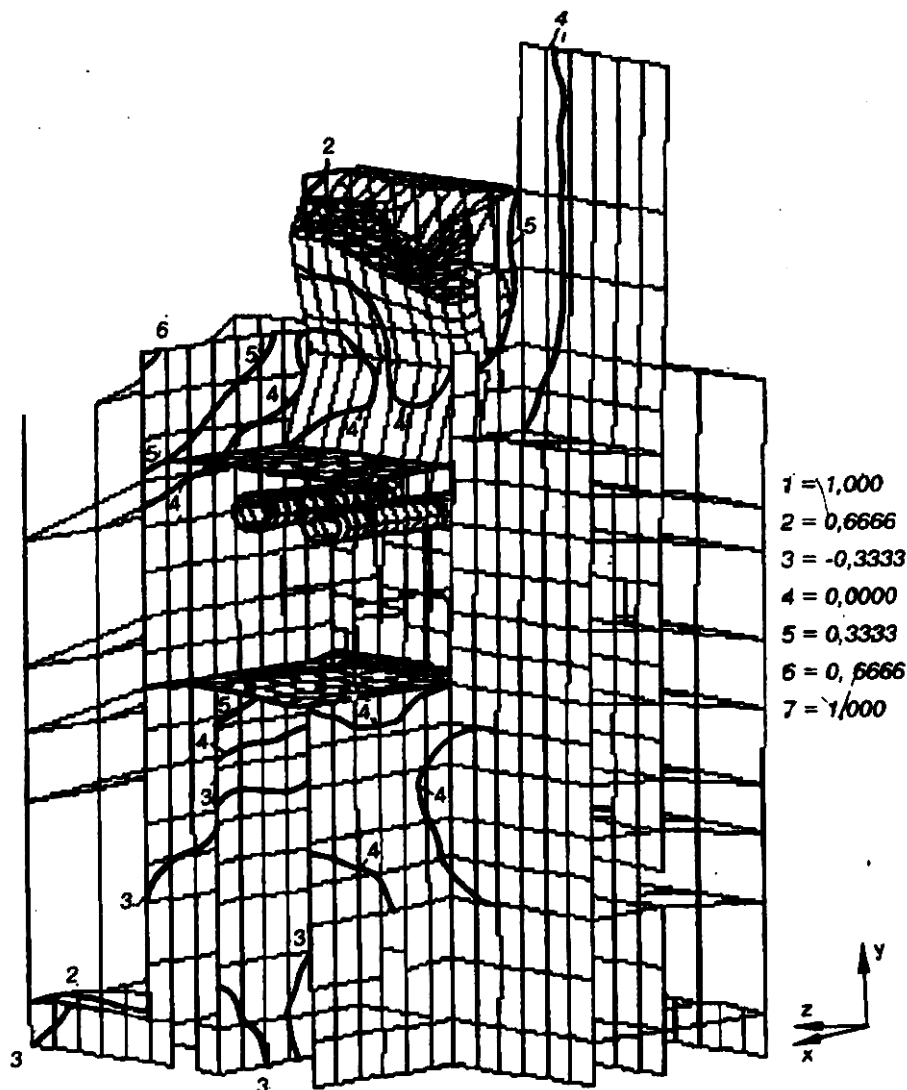


Рис. 2. Картина распределения напряжений σ_y , возникающих в конечно-элементной модели опорных конструкций.

растягивающие напряжения в бетоне со значениями 0,4-0,6 МПа, а в местах концентраторов (в углах, образованных указанными стенами) - 0,75-0,81 МПа. Сжимающие напряжения достигают в этих же элементах значений 1,9-2,1 МПа.

В конечных элементах стоек поперечных рам опалубки, расположенных вблизи ее верхнего обреза, сжимающие напряжения достигают 242,34 МПа (при $N=1,62$ МН и $M=0,0183$ МНм), тогда как расчетное сопротивление материала стоек равно только $R_y = 230$ МПа. Это свидетельствует о том, что стойки в месте опирания балок в значительной степени работают за пределом упругости, поскольку нормативное сопротивление (предел текучести) в этом случае равно $R_{yn}=235$ МПа. Вместе с тем некоторый запас прочности в стойках поперечных рам опалубки присутствует, поскольку временное сопротивление материала стоек составляет $R_u=360$ МПа, что больше полученного значения сжимающих напряжений.

83

По результатам расчета конечно-элементной модели опорных конструкций балок Б1, Б2 в осях 47-51, Г-Л между отметками +10,0 и +66,5 и была проверена прочность элементов железобетонных опорных конструкций (стен и перекрытий). Из всей совокупности элементов конечно-элементной модели для каждого участка конструктивной схемы были выбраны элементы, испытывающие наибольшие усилия. Таковыми оказались: элемент № 921 - участок стены по оси 50 в районе оси Ж на отметке +50,0 м; элемент № 1174 - участок перекрытия на отметке +31,5 и из плит ПЗ-18-5 с бетонированием по плитам; элемент № 1209 - участок перекрытия на отметке +31,5 м из плит ПЗ-12-2 с бетонированием по плитам.

За основу проверки прочности был взят принятый в [3] метод расчета по предельным состояниям. Проверка прочности сечений всех указанных выше элементов производилась для двух видов напряженного состояния - как для изгиба, так и для внецентренного сжатия.

Результаты проверки показывают, что в элементе № 921 при полученных расчетных значениях изгибающего момента и нормального усилия на действие наиболее опасного сочетания нагрузок несущая способность сечения стены использована на 53 %. При учете же только изгибающего момента несущая способность используется уже на 87,3 %, что является гораздо более худшим вариантом по сравнению с вариантом внецентренного сжатия.

В элементах перекрытия на отметке +31,5 м при действии расчетных усилий по худшему варианту несущая способность конструкций использована только в пределах 13 %, что свидетельствует о довольно значительном запасе прочности.

Таким образом, из всех железобетонных опорных конструкций балок Б1, Б2 в осях 47-51, Г-Л между отметками +10,0 и +66,5 м в наиболее опасном положении в настоящее время находятся элементы конструкции стены по оси 50, расположенные между осями И и (Д-Е) на отметке +50,0 м, к которым примыкает оставшаяся в проектном положении уцелевшая монолитная часть перекрытия. Именно в этом месте находится наиболее напряженный конечный элемент стены № 921, для которого проверка несущей способности была выполнена выше. Однако для получения полной картины работы этого участка была проведена сплошная проверка несущей способности элементов стены по оси 50 между указанными буквенными осями в двух уровнях - на отметках -1-50,0 и +48,0 м. Анализ представленных результатов позволил сделать вывод о том, что запас несущей способности в элементах конструкции стены по оси 50 достаточно медленно нарастает вправо, влево и вниз от конечного элемента № 921. Так, в непосредственно примыкающих к нему элементах запас несущей способности все еще не очень велик и составляет для правого (№ 922) и для левого (№ 914) элементов всего 22,2 %, а для нижнего (№ 918) элемента - 52,7 %. Приведенные данные являются дополнительным подтверждением сделанного ранее вывода об опасном состоянии стены по оси 50 между осями И и (Д-Е) на отметке +50,0 м.

ВЫВОДЫ

В результате численного исследования опорных конструкций балок Б1, Б2 в осях 47-51, Г-Л между отметками +10,0 и +66,5 м:

1. Выявлена наиболее нагруженная зона сооружения, располагающаяся в осях 47-50, И-(Д-Е) между отметками +31,5 и +58,5 м.

84

2. Установлено, что в указанной зоне существуют два участка, напряжения в которых по сравнению с другими элементами конструкции рассматриваемого сооружения принимают достаточно большие значения. Этими участками являются:

а) элементы конструкции стены по оси 50, а также элементы конструкций стен, расположенных вдоль оси И и между осями Д и Е на отметке +50,0 м, к которым примыкает оставшаяся в проектном положении уцелевшая монолитная часть перекрытия. Здесь наблюдаются довольно большие растягивающие напряжения в бетоне, что может привести к образованию трещин;

б) элементы стоек поперечных рам опалубки, которые в месте опирания балок работают за пределом упругости. Это может привести к исчерпанию конструкцией своей несущей способности.

1. *Исследование состояния опорных конструкций балок укрытия Б1, Б2 в осях 47-51, Г-Л аварийного блока ЧАЭС // Отчет по НИР, НИИМБП по договору № 14 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Кн. 1: Численные исследования напряженно-деформированного состояния опорных конструкций. - Киев, 1993. - 382 с.*

2. *Дополнительная экспертиза состояния строительных конструкций укрытия аварийного блока ЧАЭС // Отчет по НИР, НИИМБП по договору № 5 от 04.01.94 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Кн. 4: Исследование напряженно-деформированного состояния строительных конструкций 4-го энергоблока ЧАЭС и объекта «Укрытие». - Киев, 1994 - 462 с.*

3. *СНИП 2.03.01-84 «Бетонные и железобетонные конструкции». - М.: ИИТП Госстроя СССР, 1985. - 79 с.*

Получено 11.04.96

УДК 533.6

Л. В. Андрощук, Б. П. Иващенко, С. К. Никитин
АНАЛИЗ ОБРАЗОВАНИЯ И ДВИЖЕНИЯ ПЫЛЕВОГО ОБЛАКА
В СЛУЧАЕ РАЗРУШЕНИЯ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»

В результате проведенных исследований построена математическая модель процесса образования и движения пылевого облака в объекте «Укрытие» в случае падения его кровли. Предложенная методика и разработанный пакет прикладных программ позволяют исследовать процесс пылеобразования при различных сценариях разрушения объекта «Укрытие». Полученные результаты могут быть использованы при разработке системы пылеподавления и других мероприятий по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС.

В связи с возможностью разрушения объекта «Укрытие» существует опасность образования радиоактивного пылевого облака и выхода его за пределы ОУ. Разрабатываются мероприятия по предотвращению этой опасности; в частности, проектируется аварийная система пылеподавления [1].

Можно определить следующие фазы процесса образования и распространения пылевого облака: естественное движение пыли в неразрушенном ОУ; образование и движение пылевого облака при разрушении строительных конструкций; перемещение пылевого облака под воздействием ветра; распространение пылевого облака по территории Украины с учетом макроструктуры атмосферы.

© Л. В. Андрощук, Б. П. Иващенко, С. К. Никитин, 1996

85

Целью настоящей работы является исследование процесса образования и движения пылевого облака в объекте «Укрытие» в случае разрушения строительных конструкций.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд сложных взаимосвязанных задач:

построение математической модели процесса образования и движения пылевого облака;

разработка методики решения поставленной задачи и программная реализация метода решения;

численный анализ процесса образования и движения пылевого облака при определенной модели разрушений.

В соответствии с механикой сплошных сред пылевое облако можно рассматривать как гетерогенную среду, а именно суспензию мелких частиц в жидкости. Механика суспензий изучает макроскопические свойства гетерогенных сред по известным свойствам составляющих компонентов. При этом свойства среды в целом зависят не только от свойств составляющих компонентов, но и существенно определяются характером процессов, происходящих в окрестности отдельного ее «зерна» [2].

Построение математической модели облака осуществляем, исходя из континуальных уравнений, описывающих одну реализацию суспензии с последующим переходом к уравнениям для суспензии как макроскопической среды. Полагаем, что поведение частиц может быть описано с помощью зависимостей механики сплошных сред.

Определяющие уравнения для суспензии можно разделить на две группы: законы сохранения и уравнения состояния. Основная пара таких уравнений, связанная с реологией суспензий, включает в себя закон сохранения импульса и уравнение для напряжений. Другие уравнения сохранения или состояния рассматриваются аналогично. Уравнение импульса в векторной форме имеет вид

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \right) \rho \mathbf{u} = \nabla \sigma + \mathbf{f}, \quad (1)$$

где ρ - плотность; $\mathbf{u}$ - эйлерова скорость; σ - тензор напряжений; $\mathbf{f}$ - плотность силы; t - время.

Уравнения состояния зависят от типа конкретной суспензии. В связи с тем, что скорость движения частиц меньше скорости звука, будем считать, что скорость во всех точках пространства удовлетворяет условию солёноидальности:

$$\nabla u = 0, \quad (2)$$

с которым ассоциировано поле давления p , определяемое как одна треть следа тензора напряжений, взятая со знаком минус. Жидкость всегда считается ньютоновской

$$\sigma = -pI + 2\mu e,$$

где $e = (\nabla u + \nabla u^T) / 2$ – тензор эйлеровой скорости деформации; I – единичный тензор; μ – коэффициент вязкости.

86

Усредним основные уравнения, используя усреднение по ансамблю. В качестве временных обозначений введем ломаные скобки для обозначения среднего значения. Усредненное уравнение импульса имеет вид

$$(\partial/\partial t + \langle u \rangle \nabla) \langle \rho u \rangle = \nabla (\langle \sigma \rangle - \langle \rho u \rangle \langle u \rangle) + \langle f \rangle. \quad (3)$$

Совмещая среднее напряжение Рейнольдса со средним тензором напряжений получаем единый тензор средних напряжений.

Макроскопические уравнения движения составляют замкнутую систему в том случае, если после усреднения удастся получить достаточное число локальных соотношений между средней скоростью $\langle u \rangle$, средней скоростью деформации $\langle e \rangle$, средним потоком массы $\langle \rho u \rangle$, средней плотностью $\langle \rho \rangle$, средним напряжением $\langle \sigma \rangle$, средней силой $\langle f \rangle$ и, возможно, несколькими средними величинами, характеризующими микроскопическое состояние, вместе с макроскопическими уравнениями состояния для них. Рассмотрим задачу усреднения уравнения состояния, которое по-разному определено в двух фазах. Эти уравнения для двух фаз удобно объединить в одно соотношение:

$$\sigma(x) = -p(x)I + 2\mu s(x) + s(x) \quad \text{для всех } x, \quad (4)$$

где s – обобщенная функция, равная нулю, если x – точка в жидкости; если x лежит внутри частицы, то s – избыточное напряжение по сравнению со своим значением, которое задается соотношением, применяемым в точке x , свойственным для жидкости. Хотя избыточное напряжение в частицах s определяется уравнением состояния для частиц, его значение в конечном итоге зависит от полной конфигурации частиц (посредством полного решения краевой задачи на микроуровне). Уравнения состояния, приведенные к единственному уравнению (4), легко усредняются:

$$\langle \sigma \rangle \langle x \rangle = - \langle p \rangle \langle x \rangle I + 2\mu \langle e \rangle \langle x \rangle + \langle s \rangle \langle x \rangle. \quad (5)$$

Среднее напряжение превышает напряжение, определяемое законом для чистой жидкости, на величину $\langle s \rangle$, обусловленную частицами. Микроскопическое поле давления $\langle p \rangle$ локально неопределимо и ассоциировано с макроскопическим условием солёноидальности:

$$\nabla \langle u \rangle = 0. \quad (6)$$

Предыдущие преобразования свидетельствуют о необходимости в дальнейшем усреднять величины только внутри частиц, так как в жидкости величина s исчезает. Чтобы далее выразить эту зависимость от положения внутри частицы, рассмотрим s как величину, отличную от нуля в точке x , поскольку эта точка лежит внутри частицы с центром в x_1 .

$$\langle s \rangle (x) = \int_{|x_1 - x| \leq a} \langle s \rangle (x|x_1) P(x_1) d^3x_1, \quad (7)$$

Тогда

где интегрирование выполняется по конечному объёму, такому, что x лежит внутри частицы с центром в x_1 ; $P(x_1)$ – функция плотности вероятности того, что центр частицы расположен в x_1 , $\langle s \rangle (x|x_1)$ – избыточное напряжение в частице в точке x , усредненное по подклассу реализаций, в которых центр одной частицы зафиксирован в x_1 .

87

Если имеются частицы нескольких видов, например разных размеров, формы, ориентации или состава, то единственный вектор центра частицы должен быть заменен величиной, определяющей вид частицы так же, как и ее положение.

Целесообразно ограничиться локально однородной суспензией, под которой понимается суспензия, где все функции плотности вероятности изменяются при параллельном переносе (но не обязательно при конфигурационных изменениях) только на расстояниях порядка макроскопического линейного масштаба, значительно превышающего микроструктурный масштаб. Микроструктурный линейный масштаб - это масштаб, на котором изменяются с изменением $x-x_1$ существенные величины, например $(u)(x|x_1)$. Во многих случаях оказывается, что микроструктурный линейный масштаб - это размер частицы. Однако в задаче о проницаемости неподвижного слоя он оказывается больше и равен длине взаимодействия. Известно, что расстояние между частицами в разбавленной суспензии не является важной микроструктурной длиной, если только функция плотности вероятности не зависит от него. Таким образом, при использовании усреднения по ансамблю нет необходимости, чтобы расстояние между частицами было меньше макроскопического линейного масштаба, в то время как такая необходимость имеется в подходе, основанном на усреднении по объему. Конечно, в практических приложениях, когда желательно, чтобы теоретическое среднее по ансамблю приближало измерение в единственном опыте, сглаживающее измеряемую величину по некоторому стационарному параметру (объему, поверхности, длине или времени), макроскопический масштаб должен превышать размер образца, а последний в свою очередь должен превышать расстояние между частицами.

В предположении о локальной однородности функцию вероятности $P(x_1)$ в (7) можно рассматривать как постоянную, равную своему значению в точке x , вокруг которой x_1 изменяется в пределах размера частицы, и, таким образом, ее можно вынести за знак интеграла. Поправки на небольшую неоднородность можно сделать, если заменить постоянную $P(x)$ несколькими членами разложения Тейлора для $P(x_1)$ в точке $x-x_1$. Локальная однородность позволяет также совершить параллельный перенос на малую величину $x-x_1$ в двух аргументах условно усредненного избыточного напряжения в частице $(s)(x|x_1)$, приравнивая его величине $\langle s \rangle (x + (x - x_1)|x)$. Таким образом, вклад частиц в среднее напряжение становится равным

$$\langle s \rangle (x) = P(x) \int_{|x_1-x| \leq a} \langle s \rangle (x|x_1) dv, \quad (8)$$

где интегрирование распространено на все точки x внутри частицы с центром в точке x_1 . Это выражение показывает, что в случае, когда имеется локальная однородность, усреднение по ансамблю сводится к объемному. Последний объемный интеграл можно заменить поверхностным, который для жестких частиц оказывается более целесообразным. Используя условие малости числа Рейнольдса и теорему Гаусса, для частиц, свободных от внешних сил ($f=0$ внутри частиц), имеем

88

$$\int_{|x_1-x| \leq a} \langle s \rangle (x|x_1) dv = \Sigma A + \int_{|x_1-x| \leq a} \left\{ \langle \sigma \rangle (x|x_1) n x - \mu \left[\langle u \rangle (x|x_1) n < u \rangle (x|x_1) \right] \right\} ds, \quad (9)$$

где ΣA - сумма изотропных членов.

При этом член в квадратных скобках влияет на жесткие частицы. Далее везде все полевые величины u , e , σ , p и s встречаются как усредняемые по ансамблю, возможно, при условии, что некоторые из них фиксированы. Поэтому обозначения для усреднения опускаем.

Выражение для среднего напряжения, полученное выше, не дает замкнутого описания суспензии в целом, так как в него введено дополнительное поле $s(x|x_1)$. Ниже выводится замкнутое описание, асимптотически верное для разбавленной суспензии.

До сих пор на суспензию были наложены два ограничения - ограничения безынерционной динамики для частиц и локальной однородности. Поэтому потребуем, чтобы частицы были разделены расстояниями, большими по сравнению с максимальным размером частицы. Для геометрически подобных частиц, не отличающихся сложной формой, это сводится к малости объемной доли частиц c . Для частиц сложной формы объемная концентрация должна быть еще меньшей, так, чтобы была малой объемная доля наименьших

сферических оболочек вокруг каждой частицы. Потребуем также, чтобы суспензия, кроме того, что она разбавлена, была в разумной степени случайной. В частности, вероятность того, что n разных частиц образуют какую-либо определенную конфигурацию, должна быть величиной порядка $O(C^n)$ и изменяться при переходе от одной конфигурации к другой только на расстояниях порядка размера частиц, не изменяясь на большем расстоянии, например на расстоянии между частицами.

Вычисление вклада $s(x)$ частиц в среднее напряжение требует согласно (7) вывода выражения для усредненного напряжения в частице $s(x|x_1)$ в точке x при условии, что центр одной из частиц расположен в точке x_1 . Необходимо вывести уравнения, описывающие средние поля, и далее решить их, пренебрегая членами, которые становятся малыми в пределе разбавленной суспензии.

Уравнения, управляющие средними полями в x , определенными при условии, что центр частицы расположен в x_1 , выводятся с помощью изложенной выше процедуры, производится условное усреднение законов сохранения и уравнений состояния. По усредненному закону сохранения импульса (1) в случае безынерционной динамики частиц, свободных от внешних сил, получаем

Тогда условие несжимаемости (2) принимает вид

При выводе этих уравнений использованы преимущества усреднения по ансамблю по сравнению с другими типами усреднения. Усреднение по ансамблю может свободно

89

коммутировать с операторами дифференцирования в пространстве и по времени. Условное усреднение уравнений комбинированной форме приводит к выражению

$$\sigma(x|x_1) = -p(x|x_1)I + 2\mu e(x|x_1) + s(x|x_1), \quad (12)$$

причем, используя (7), напряжение в частице в

$$\nabla u(x|x_1) = 0.$$

(11) ем избыточное форме

$$s(x|x_1) = \int_{|x_1-x| \leq a} s(x|x_1, x_2) p(x|x_1) dx_2. \quad (13)$$

Здесь интеграл распространен на конечный объем, такой, что x лежит внутри частицы с центром в x_2 , $P(x_2|x_1)$ - функция плотности вероятности того, что имеется частица с центром в x_2 при условии, что есть частица с центром в x_1 , $s(x|x_1, x_2)$ - избыточное напряжение в точке x частицы, усредненное по подклассу полного ансамбля, в котором имеются частицы с центрами в x_1 и x_2 . Если $x_1 = x_2$, то в условиях, когда есть частица с центром в x_1 , с достоверностью имеется и частица с центром в x_2 . Введение этой единственной дельта-функции в $P(x_2|x_1)$ обеспечивает то, что $\sigma(x|x_1)$ задается уравнением состояния для частицы в случае, когда x находится внутри частицы с центром в x_1 . Если бы было использовано альтернативное определение $P(x_2|x_1)$, подчиненное требованию, чтобы частицы в x_1 и x_2 были различными, то правую часть соотношения (13) следовало бы заменить двумя выражениями, одно из которых действовало бы в случае, когда x лежит внутри частицы в x_1 , а другое - в случае, когда x лежит вне частицы.

Для того чтобы замкнуть макроскопические уравнения (3) и (5)-(7) путем вывода уравнений (10)-(13), управляющих условно усредненными полями с одной фиксированной частицей, было введено поле $s(x|x_1, x_2)$, усредняемое при условии, что фиксированы две частицы. Повторение процедуры для поля с двумя фиксированными частицами приведет к полю с тремя фиксированными частицами; продолжал это далее, можно получить полную бесконечную цепочку. Затем необходим ее обрыв, который может быть осуществлен путем рационального использования условия разбавленности. Поскольку принято допущение о случайности, типичная условная плотность вероятности, например $P(x_n|x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$,

умноженная на объем частицы, имеет порядок малой объемной доли частиц c до тех пор, пока все n частиц различны. Пренебрегая малыми членами вида $O(c)$ на различных уровнях этой бесконечной цепочки, получаем набор приближений. В самом нижнем приближении пренебрегаем членом $s(x)$ в (5), так как он меньше других членов в (5) ввиду наличия множителя $P(x_1)$ в (7), который имеет порядок $O(c)$, где c - объемная доля частиц. На этом уровне приближения суспензия в целом ведет себя при $c \rightarrow 0$ как чистая жидкость.

90

На следующем уровне приближения в (12) пренебрегаем членом $s(x|x_1)$ в случае, когда x не находится внутри частицы с центром в x_1 , так как он меньше других членов в (12) ввиду наличия множителя $P(x_2|x_1)$ в (13), имеющего порядок $O(c)$. Этот уровень приближения, который вносит в среднее напряжение главный обусловленный частицами вклад, будет рассмотрен в оставшейся части этой статьи.

Задача вычисления среднего напряжения с точностью до членов $O(c)$ сводится к следующему. Значения $s(x|x_1)$ для x , лежащих в частице с центром в x_1 , должны быть найдены с точностью $O(1)$, так, чтобы можно было оценить интеграл в (7). Средние поля $\sigma(x|x_1)$ и $e(x|x_1)$ находятся путем решения уравнений (10) и (11) вместе с приближением, дающим пренебрежимо малую ошибку порядка $O(c)$ вне частицы. Имеются обычные граничные условия на поверхности частицы с центром в x_1 . Наконец, устанавливается связь между условно усредненными полями и макроскопическим состоянием путем применения граничного условия на $u(x|x_1)$ в случае, когда точка x расположена далеко от частицы с центром в x_1 . Чтобы условно усредненное состояние стремилось к макроскопическому состоянию, необходимо наложить условие

$$u(x|x_1)u(x) \text{ при } |x - x_1| \Rightarrow \infty. \quad (14)$$

Это условие предполагает, что уравнения, которым подчиняется величина $u(x|x_1)$, допускают ее стремление к асимптотическому значению $u(x)$, а суспензия в разумных пределах случайна и занимает бесконечный объем по сравнению с конечным объемом частицы. Приемлемая форма для условия (14) на бесконечности в задаче о среднем напряжении при использовании условия о локальной однородности может быть найдена в виде

$$u(x|x_1)u(x_1) + (x - x_1)[\omega(x_1) + e(x_1)] \quad (15)$$

(при $|x - x_1| \gg$ размера частиц),

где ω и e - макроскопические завихренность и скорость деформации. Это завершает постановку задачи об определении среднего напряжения с точностью до величин $O(c)$.

Алгоритм вычисления среднего напряжения известен, ниже он приводится вкратце для жестких сфер радиуса a , которые не были предварительно напряжены. Решение уравнений (10), (11), (15) имеет вид

$$\begin{aligned} u(x|x_1) &= u(x_1) + r \omega(x_1) \text{ для } r \leq a, \\ u(x|x_1) &= u(x_1) + r \omega(x_1) + \\ &+ e(x_1) / \left\{ r I \left(1 - (a/r)^5 \right) + (5/ra)^2 r r r \left((a/r)^5 - (a/r)^7 \right) \right\} \\ &\text{для } r \geq a, \end{aligned}$$

91

где $r = x - x_1$. Напряжение в жесткой сфере

$$\sigma(x|x_1) = -p(x_1)I + 5\mu e(x_1) + O(c),$$

так что избыточное напряжение в частице

$$s(x|x_1) = 5\mu e(x_1) + O(c), \quad r \leq a.$$

Подставляя полученное выражение в соотношение (7), на основании локальной однородности величины e и $P(x_1)$ в точке x_1 можно аппроксимировать их значениями в точке x :

$$\sigma(\mathbf{x}) = -p(\mathbf{x})\mathbf{I} + 2\mu(1 + 5/2c)\mathbf{e}(\mathbf{x}). \quad (16)$$

Таким образом, получены усредненные уравнения импульса и уравнения состояния. Используя их, следует учитывать, что в случае пылевого облака взвешивающей жидкостью является воздух; кроме того, в [3] отмечено, что движение частиц топливосодержащих масс с приведенными размерами можно рассматривать как движение воздушного потока. Поэтому в данном случае целесообразно использовать упрощенный вариант полученных уравнений в виде усредненных уравнений динамики сжимаемой среды.

Тогда эйлеровы уравнения в векторной форме можно представить так [4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \mathbf{v}) &= 0, \\ \frac{\partial (\gamma \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) &= -\nabla p, \\ \frac{\partial E_p}{\partial t} + \nabla p \cdot \mathbf{v} + \nabla (E_p \mathbf{v}) &= 0, \\ E_p &= E_p(p, \gamma), \end{aligned} \quad (17)$$

где γ - усредненная плотность среды, $\mathbf{v}$ - вектор скорости, E_p - полная энергия элементарного объема газа, t - время.

В произвольных криволинейных координатах система уравнений (17) в дифференциальной форме для осесимметричных задач имеет вид

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{A}} \frac{\partial}{\partial y^i} (\gamma v^i \sqrt{A}) = 0, \quad (18)$$

$$\frac{\partial (\gamma v_k^*)}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{A}} \frac{\partial}{\partial y^i} (\gamma v_k^* v^i \sqrt{A} + b_k^i p + b_k^i \gamma C |v_k^*| v^i \sqrt{A}) = 0, \quad (19)$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{A}} \frac{\partial}{\partial y^i} [E_p v^i + v^i p + (\gamma C v_m^* |v_m^*| v^i) \sqrt{A}] = 0, \quad (20)$$

$$E_p = E_p(p, \gamma), \quad (21)$$

где v_k , v^i - компоненты вектора скорости в декартовой X, Y, Z и криволинейной y^1, y^2, y^3 системах координат; A - фундаментальный определитель метрической

92

формы жидкости; b_k^i - алгебраическое дополнение якобиана J^{-1} преобразования декартовой системы координат к криволинейной, которое соответствует члену j_{ik} , C - параметр искусственной вязкости.

Уравнения (18)-(21) представляют собой смешанную систему гиперболически-параболических уравнений, записанных в дивергентной форме. Связь между декартовыми v_k^* и контравариантными v^i компонентами вектора скорости $\mathbf{v}$ определяется соотношением

$$v_k^* = J^{-1} v^i.$$

Уравнение состояния среды примем в виде

$$E_p = \gamma \left(\frac{v^2}{2} + e \right),$$

где e - внутренняя энергия среды.

Геометрия исследуемой области определена уравнениями перехода от декартовой системы координат к криволинейной:

$$X = X(y^i), Y = Y(y^i), Z = Z(y^i). \quad (22)$$

Тогда величины ковариантных a_{ij} компонентов метрического тензора и его фундаментального определителя записываются следующими формулами:

Якобиан преобразования декартовой системы координат к криволинейной имеет вид

$$a_{ij} = \frac{\partial X}{\partial y^i} \frac{\partial X}{\partial y^j} + \frac{\partial Y}{\partial y^i} \frac{\partial Y}{\partial y^j} + \frac{\partial Z}{\partial y^i} \frac{\partial Z}{\partial y^j}, \quad \text{образом:} \quad v^i = 0.$$

$$A = \det \|a_{ij}\| = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}.$$

В случае отсутствия массовых сил давление среды на бесконечности равно атмосферному давлению воздуха: $P = P_0$.

Уравнения (18)-(21) вместе с граничными условиями (23), (24), описывают движение сжимаемой жидкости в неограниченном пространстве. Геометрия занятого жидкостью, определяется уравнениями компонентами метрического тензора.

Для 93 явная этой схеме (шаг Например, для предиктор:

$$J^{-1} = \|j_{ij}\| = \begin{vmatrix} \frac{\partial X}{\partial y^1} & \frac{\partial X}{\partial y^2} & \frac{\partial X}{\partial y^3} \\ \frac{\partial Y}{\partial y^1} & \frac{\partial Y}{\partial y^2} & \frac{\partial Y}{\partial y^3} \\ \frac{\partial Z}{\partial y^1} & \frac{\partial Z}{\partial y^2} & \frac{\partial Z}{\partial y^3} \end{vmatrix}.$$

решения полученных уравнений используется разностная система Мак-Кормака [5]. Согласно выполняется предварительный расчет функций предиктор) и уточняющий расчет (шаг корректор). уравнения неразрывности схема записывается так:

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}_{i,j}^{n+1} = & \gamma_{i,j}^n - \frac{1}{\sqrt{A}} \left\{ \frac{\Delta t}{\Delta y^1} \left[\left(\gamma v^1 \sqrt{A} \right)_{i+1,j} - \left(\gamma v^1 \sqrt{A} \right)_{i,j} \right] + \right. \\ & \left. + \frac{\Delta t}{\Delta y^3} \left[\left(\gamma v^3 \sqrt{A} \right)_{i+1,j} - \left(\gamma v^3 \sqrt{A} \right)_{i,j} \right] \right\}; \end{aligned}$$

корректор:

$$\begin{aligned} \gamma_{i,j}^{n+1} = & \frac{1}{2} \left\{ \gamma_{i,j}^n + \bar{\gamma}_{i,j}^{n+1} - \frac{\Delta t}{\Delta y^1} \left[\left(\bar{\gamma} v^1 \sqrt{A} \right)_{i,j} - \left(\bar{\gamma} v^1 \sqrt{A} \right)_{i-1,j} \right] - \right. \\ & \left. - \frac{\Delta t}{\Delta y^3} \left[\left(\bar{\gamma} v^3 \sqrt{A} \right)_{i,j} - \left(\bar{\gamma} v^3 \sqrt{A} \right)_{i-1,j} \right] \right\}, \end{aligned}$$

шаг по времени. Для этих уравнений схема Мак-Кормака записывается явно.

Эта схема имеет порядок точности

как по времени, так и по

пространству. На шаге предиктор для аппроксимации производных в пространстве используются разности вперед, а на шаге корректор - разности назад. Разности вперед и назад чередуются как на шагах предиктор - корректор, так и при аппроксимации производных по пространственным координатам. Это ликвидирует несогласованность, обусловленную применением односторонних разностей. Для обеспечения устойчивости счета наряду с введением искусственной вязкости применяется подход Лакса [6].

Для решения рассматриваемой задачи с помощью численного разностного метода Мак-Кормака разработан пакет прикладных программ (ППП), блок-схема которого представлена на рис. 1.

В главной программе пакета считываются исходные данные из заранее подготовленного файла, а именно: характеристики исследуемой среды, геометрические параметры исследуемой области, параметры разностной сетки, величина шага по времени, признаки вывода необходимой информации на печать (np), длительность счета, т. е. количество итераций (kst). Далее следует обращение к подпрограмме, где вычисляются компоненты метрического тензора, определитель метрического тензора, необходимые алгебраические дополнения к компонентам якобиана преобразования декартовой системы

координат к криволинейной и выполняется возврат в главную программу, после чего осуществляется основной цикл по времени и реализуется схема Мак-Кормака.

Подпрограмма подготовки рабочих массивов предназначена для вычисления произведений $\gamma v^i \sqrt{A}$, $\gamma v_k^* v^i \sqrt{A}$, $b_k^i p$, $b_k^i \gamma C |v_k^*| v_i^* \sqrt{A}$, $E_p v^i$, $v^i p$, $\gamma C v_m^* |v_m^*| v^i$,

94

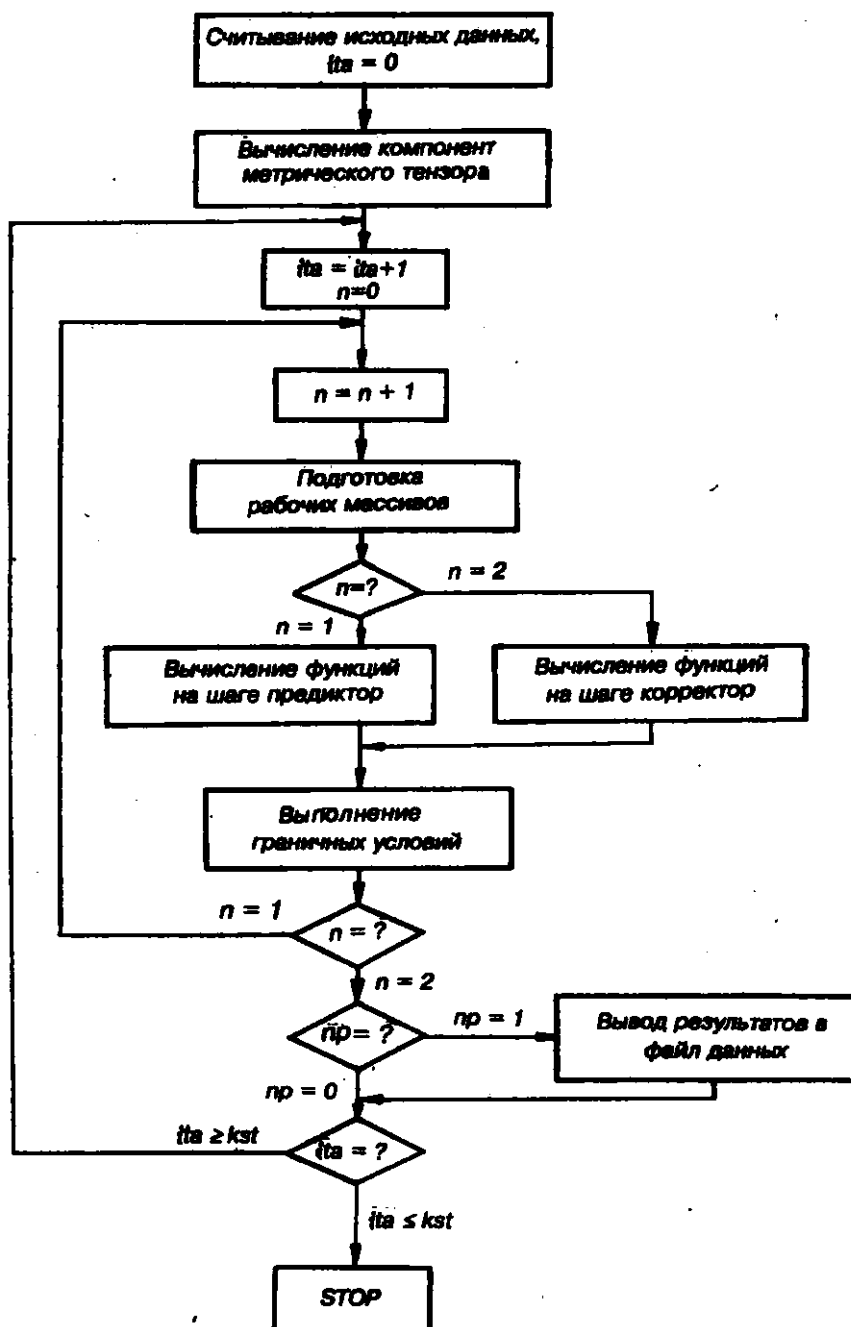


Рис. 1. Блок-схема анализа движения пылевого облака входящих в уравнения динамики среды (18)-(21). Эта подпрограмма готовит промежуточные массивы перед выполнением подпрограмм «предиктор» и «корректор», которые соответственно реализуют схему Мак-Кормака на шагах предиктор и корректор, в результате чего получаем величины γ , γv_k^* , E_p . Поскольку находим произведения γv_k^* , а интерес представляют компоненты вектора скорости в декартовой системе координат v_k^* , то в подпрограмме подготовки рабочих массивов выполняется операция декодирования массива γv_k^* и получение компонентов вектора скорости.

95

Граничные условия реализуются после предварительного расчета функций в подпрограмме «предиктор» и после окончательного расчета функций в подпрограмме «корректор».

Вывод результатов в файл данных осуществляется в соответствии с анализом параметра pr . Если $pr=1$, то на текущем временном шаге результаты записываются в выходной файл, иначе анализируется переменная ita , определяющая номер текущего временного шага. Длительность времени счета определена параметром kst .

В работе рассматривается падение кровли объекта «Укрытие» как единого целого - один из возможных вариантов разрушения объекта «Укрытие», при котором предполагается наиболее интенсивный процесс пылеобразования. В этом варианте разрушение укрытия начинается с падения западных концов балок Б1 и Б2 ряда Ж в результате возникновения в стойках поперечных рам опалубки напряжений, превышающих временное сопротивление материала стоек. Восточные концы балок Б1 и Б2, соскользнув с опорной поверхности вентиляционной шахты, падают на завал, расположенный на отметке 43,0 м (рис. 2). Обрушение балок приведет к обрушению кровли [7].

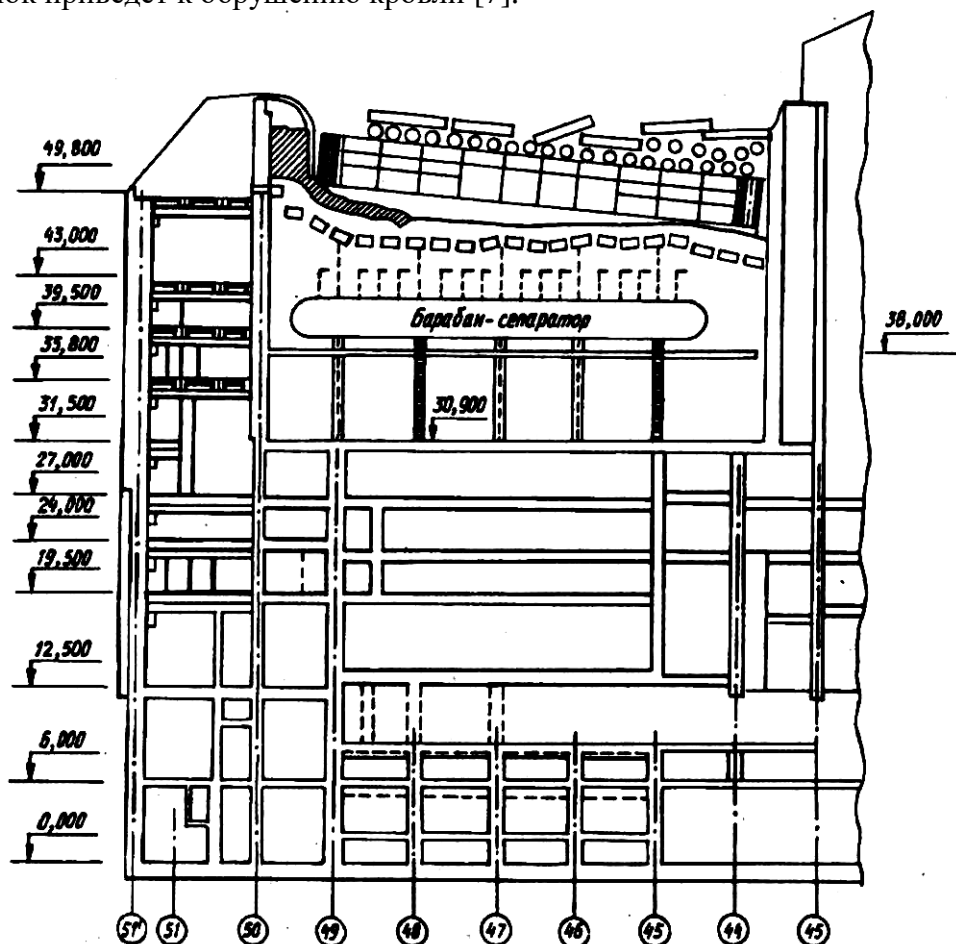


Рис. 2. Модель разрушения

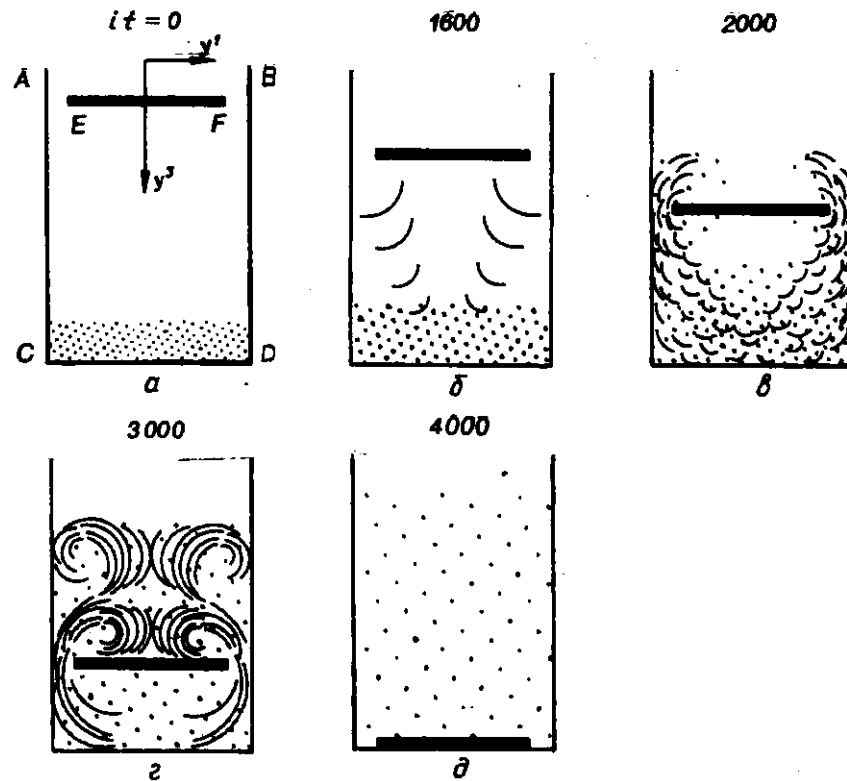


Рис. 3. Образование пылевого облака

На рис. 3,а показана схема падения кровли центрального зала. Падающая кровля EF возмущает воздух в пространстве центрального зала ABCD, что приводит к вовлечению в движение 5 т пыли [3], и обуславливает образование неоднородной среды, осредненная начальная плотность которой $\gamma=1,34 \text{ т/м}^3$. Математическая модель процесса включает в себя уравнения (17) и граничные условия, $v^{*3}=gt$ - на границе EF, $v^{*1}=0$ - на границах AC и BD, $v^{*3}=0$ - на границе CD, $\partial p / \partial x = 0$ - на жестких неподвижных границах.

На свободной границе неизвестные задаются путем линейной экстраполяции. В приведенных соотношениях n - нормаль к поверхности. В результате решения задачи найдены поля скоростей и перемещений частиц среды в различные последовательные моменты времени $t_k = k \cdot \Delta t$, k - целые числа; $\Delta t = 6 \cdot 10^{-4} \text{ с}$. Скорость подъема частиц среды не превышает 12,5 м/с. Следует отметить, что после падения кровли движение среды быстро затухает (рис. 3,д). Процесс формирования облака показан на рис. 3,б-г, при этом указанные позиции соответствуют моментам времени $k=1600, 2000, 3000, 4000$. В целом высота подъема облака не превышает 13 м за время падения покрытия. При этом последующее влияние ветра на движение облака не учитывается.

1. Чернобыльская АЭС. Объект «Укрытие». Аварийная система пылеподавления // Отчет по НИР, НИИ МБП по договору № 34/95 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Т. 1, кн. 1: Техническое предложение. — Киев, 1995. — 154 с.
2. Хинч Э. Подход к анализу взаимодействий частиц в текучей суспензии // Гидродинамическое взаимодействие частиц в суспензиях. — М.: Мир, 1980. — С. 154-193.
3. Техническое задание на разработку проекта аварийной системы пылеподавления на разрушенных конструкциях объекта «Укрытие». ТМ-38.776.00.ТЗ. Чернобыль, 1993. - 50 с.

4. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 2. - М.: Мир, 1991. - 552 с.
5. Андерсон Д., Таннехил Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. Т. 2. - М.: Мир, 1990. - 392 с.
6. Lax P. D. Weak solution of nonlinear hyperbolic equations and their numerical computatia // Commun Pure and Appl. Math. - 1954. - 7. - P. 159-193.
7. Чернобыльская АЭС. Объект «Укрытие». Аварийная система пылеподавления // Отчет по НИР, НИИМБП по договору № 34/95 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Т. 4: Эффективность аварийной системы пылеподавления. - Киев, 1995. - 154 с.

В. А. Прусов, О. В. Копейка, Р. Ю. Грымов
ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МЕЗОМАСШТАБНАЯ МОДЕЛЬ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИМЕСИ

ОТ МГНОВЕННЫХ И СТАЦИОНАРНЫХ ТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ВЫБРОСОВ

Предлагается комплексная оперативная модель численного прогноза на ПЭВМ полей скорости ветра, температуры, давления, облачности, осадков, а также формирования и переноса полей загрязнения от мгновенных и постоянно действующих точечных источников выбросов примеси в атмосферу при реальных погодных условиях в области с произвольными линейными размерами. Модель позволяет решать задачи прогноза состояния атмосферы, подвергнувшейся техногенным воздействиям при аварийных и штатных режимах работы промышленных предприятий. Задача найдет применение в прогнозах трансграничного переноса загрязнения в атмосфере.

1. Постановка и решение мезометеорологической задачи. Предлагается мезомасштабная модель, в которой сетка с высоким пространственным разрешением вложена в сетку с грубым разрешением макромасштабной численной модели прогноза погоды. Координатная система учитывает рельеф подстилающей поверхности. Постановка начальных и нестационарных краевых условий осуществляется на основе результатов решения макромасштабной численной модели в рамках схемы «одностороннего воздействия». Для численной реализации поставленной задачи предлагается эффективный интерполяционный однократный метод решения.

В системе координат, связанной с рельефом подстилающей поверхности, мезомасштабная математическая модель атмосферных процессов включает в себя полные уравнения гидро-, термодинамики Рейнольдса в приближении несжимаемой жидкости. Эта система уравнений осредненного движения содержит турбулентные (рейнольдсовы) напряжения - $-\overline{v_i'v_j'}$ и потоки скалярной величины - $-\overline{v_j'\theta'}$. Для замыкания системы уравнений эти члены должны быть аппроксимированы с помощью модели турбулентности.

Модель турбулентности. Для течений общего вида введенная Буссинеском гипотеза, связывающая рейнольдсовы напряжения с градиентами скоростей осредненного течения, описывается следующим выражением:

$$-\overline{v_i'v_j'} = \nu_t \left[\left(\frac{1}{\xi} \right) \delta_{3j} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \left(\frac{1}{\xi} \right) \delta_{3i} \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - (1 - \delta_{3j}) \frac{\varphi_j}{\xi} \frac{\partial v_i}{\partial x_3} - (1 - \delta_{3i}) \frac{\varphi_i}{\xi} \frac{\partial v_j}{\partial x_3} \right] - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad (1.1)$$

где ν_t - коэффициент турбулентной вязкости, k - кинетическая энергия турбулентности.

В. А. Прусов, О. В. Копейка, Р. Ю. Грымов, 1998

98

По прямой аналогии с турбулентным переносом количества движения (1.1) предполагается следующее соотношение между турбулентным переносом скалярной величины θ и ее градиентом:

$$-\overline{v_j'\theta'} = \frac{\nu_t}{\sigma_t} \left[\left(\frac{1}{\xi} \right) \delta_{3j} \frac{\partial \theta}{\partial x_j} - (1 - \delta_{3j}) \frac{\varphi_j}{\xi} \frac{\partial \theta}{\partial x_3} \right]. \quad (1.2)$$

Уравнениями (1.1) и (1.2) коэффициент турбулентной вязкости ν_t ($\sigma_t = 1/\text{Pr} = 1/\text{Sh}$, где Pr , Sh - турбулентные числа Прандтля и Шмидта) вводится как скалярная величина, т. е. предполагается изотропность ν_t . В условиях больших чисел Рейнольдса, когда превалирует локальная изотропность, это допущение является оправданным.

Будем считать, что ν_t подчиняется уравнению «самодиффузии»:

$$\begin{aligned} \frac{dv_t}{dt} = Q + \left(\frac{1}{\xi}\right)^{\delta_{3j}} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{v}{\sigma} \left[\left(\frac{1}{\xi}\right)^{\delta_{3j}} \frac{\partial v_t}{\partial x_j} - (1 - \delta_{3j}) \frac{\varphi_j}{\xi} \frac{\partial v_t}{\partial x_3} \right] - \overline{v'_j v'_t} \right\} - \\ - (1 - \delta_{3j}) \frac{\varphi_j}{\xi} \frac{\partial}{\partial x_3} \left\{ \frac{v}{\sigma} \left[\left(\frac{1}{\xi}\right)^{\delta_{3j}} \frac{\partial v_t}{\partial x_j} - (1 - \delta_{3j}) \frac{\varphi_j}{\xi} \frac{\partial v_t}{\partial x_3} \right] - \overline{v'_j v'_t} \right\}, \\ i = 1, 2, 3; \quad j = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \xi &= F_2 - F_1, \\ \eta &= x_3 \frac{\partial F_2}{\partial t}, \quad \varphi_1 = \frac{\partial F_1}{\partial x} + x_3 \left(\frac{\partial F_2}{\partial x} - \frac{\partial F_1}{\partial x} \right), \quad \varphi_2 = \frac{\partial F_1}{\partial y} + x_3 \left(\frac{\partial F_2}{\partial y} - \frac{\partial F_1}{\partial y} \right), \\ d()/dt &= \partial()/\partial t + \bar{v}_i \partial()/\partial x_i, \quad \bar{v}_1 = v_1/L, \quad \bar{v}_2 = v_2/\alpha L, \\ \bar{v}_3 &= (v_3 - \varphi_1 v_1 - \varphi_2 v_2 - \eta)/\xi, \end{aligned}$$

где δ_{ij} - символ Кронекера, L - характерный линейный размер области решения, α - масштабный множитель, $F_1(x, y)$ - уравнение нижней подстилающей поверхности, $F_2(t, x, y)$ - уравнение геопотенциала изобарической поверхности, принятой за верхнюю границу области решения.

Член Q , характеризующий скорость изменения коэффициента турбулентной вязкости v_t в единице объема жидкости, имеет положительную и отрицательную части. Положительная часть, учитывающая эффект извлечения энергии из осредненного движения, может быть представлена в виде $Q_+ = k C_M$, где C_M - функция турбулентного числа Рейнольдса и стратификации атмосферы. Величина k имеет размерность квадрата скорости. Ее присутствие в этом выражении можно рассматривать как предположение, что скорость увеличения коэффициента турбулентной вязкости v_t в результате извлечения энергии из осредненного движения пропорциональна кинетической энергии случайного турбулентного движения в атмосфере.

99

Член, описывающий скорость уменьшения коэффициента турбулентной вязкости v_t , пропорционален отношению v_t/k , умноженному на вязкую диссипацию кинетической энергии в тепло. Следовательно,

В стратифицированной атмосфере скорость изменения (увеличения или уменьшения) коэффициента турбулентной вязкости v_t также обусловлена силами плавучести т. е.

$$Q_s = \frac{v_t^2}{k} \sigma \frac{g}{\theta} \frac{1}{\xi} \frac{\partial \theta}{\partial x_3}.$$

$$Q_- = \frac{v_t^2}{k} \left| \frac{\partial V}{\partial x_3} \right|^2, \quad \text{где} \quad \left| \frac{\partial V}{\partial x_3} \right|^2 = \frac{1}{\xi^2} \left[\left(\frac{\partial v_1}{\partial x_3} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_2}{\partial x_3} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_3}{\partial x_3} \right)^2 \right].$$

Здесь часто потенциал
атмосферы
здесь
виртуальная

температура потенциального потока θ_v ,

$$\theta_v = \theta(1 + 0,61q - q_1),$$

где q и q_1 - удельные влажность и водность, g - ускорение свободного падения.

Таким образом, приходим к выводу, что источниковый член Q в уравнении для коэффициента турбулентной вязкости v_t (1.3) можно рассчитывать по формуле

$$Q = k C_M - \frac{v_t^2}{k} \left[\left| \frac{\partial V}{\partial x_3} \right|^2 + \sigma \frac{g}{\theta} \frac{1}{\xi} \frac{\partial \theta}{\partial x_3} \right]. \quad (1.4)$$

Структуру формул для σ , C_M и Ps можно определить исходя из результатов работ [11] и [12, 13]. При выполнении условия баланса генерации и диссипации в уравнении для кинетической энергии турбулентности эти формулы приобретают вид

$$\sigma = C_1 \frac{1 + C_2 P_s}{1 + C_3 P_s}, \quad C_M = \frac{C_4}{\sigma(1 + C_5 P_s)}, \quad P_s = C_6 \left(\frac{v_\tau}{k C_M} \right)^2 \frac{g}{\theta} \frac{1}{\xi} \frac{\partial \theta}{\partial x_3}, \quad (1.5)$$

а выражение для кинетической энергии турбулентности следующее:

$$k = C_7 v_\tau \left[\frac{\left| \frac{\partial V}{\partial x_3} \right|^2}{C_M (1 + C_8 C_M \sigma P_s)} \right]^{1/2}. \quad (1.6)$$

Значения эмпирических констант $C_1=1,25$, $C_2=6,13$, $C_3=7,85$, $C_4=0,5$, $C_5=35,3$, $C_6=0,25$, $C_7=2,1$, $C_8=17,64$ получены на основе данных работ [11], [12, 13] и обширного экспериментального материала для пристеночных и свободных течений.

Сформулированная нелинейная задача (1.1)-(1.6) решается численно при ограничениях $-0,01 \leq P_s \leq 1$. Решение строится с применением итераций по v_τ . В качестве начальных значений можно принять $P_s=0$, $\sigma=1,25$, $C_M=0,4$.

Начальные и краевые условия для мезомасштабной задачи прогноза погоды. Постановка боковых граничных условий, учитывающая метеорологические

100

процессы и явления над территорией, окаймляющей прогностическую область, основывается на использовании вложенных сеток. При этом учитывается, что поля метеовеличин в мезомасштабной области формируются на фоне макромасштабных циркуляций атмосферы, а задача прогноза в ограниченной области строится путем комбинации двух моделей различной полноты:

мезомасштабной модели, описываемой полными уравнениями гидротермодинамики и реализуемой на мелкой сетке;

макромасштабной гидродинамической модели, описываемой упрощенными уравнениями и реализуемой на грубой сетке.

Каждая из них интегрируется отдельно по следующему алгоритму. Сначала производится численное решение макромасштабной модели. По полученным результатам на грубой сетке путем гладкого восполнения вычисляются значения зависимых переменных в граничных узлах мелкой сетки и производится численное решение мезомасштабной модели. Приведенная схема, называемая в литературе схемой «одностороннего воздействия», позволяет задавать граничные условия для мезомасштабной модели следующим образом:

$$F|_\Gamma = F_\Phi(t), \quad (1.7)$$

где F_Φ - значения метеорологических величин, полученные на основе численного решения макромасштабной модели.

Численный метод решения задачи. Метод «одностороннего воздействия» при условии, что мезомасштабная задача решается не на каждом временном шаге решения макромасштабной модели, а только на срок прогноза, очевидно, предпочтительнее других, поэтому разработка такого метода решения является актуальной задачей.

Запишем исходную систему уравнений описывающих поля u , v , w , p , ρ , θ , v_τ в компактной векторной форме:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \Omega(t, F(t, X)), \quad (1.8)$$

положив, что $F(t, X)$ означает семимерный вектор-столбец, определяемый следующим образом:

$$F = F(t, X) = (u, v, w, p, \rho, \theta, v_\tau), \quad (1.9)$$

а Ω - вектор-столбец той же размерности, каждая компонента которого представляет собой алгебраическую сумму адвективных, конвективных, диффузионных и источнико-стоковых членов рассматриваемой системы уравнений. Условия существования и единственности решения поставленной задачи Коши будем считать выполненными.

Пусть на отрезке $[0, T]$ вещественной оси t задана сетка $0 = t_1 < t_2 < \dots < t_n = T$ (сетка может быть неравномерной), в узлах которой известны значения $\{F_k(X)\}_{k=1}^n$ функции $F(t, X)$ и значения $\{\Omega_k(X, F_k)\}_{k=1}^n$ функции $\Omega(t, X, F(t, X))$, определенных на $[0, T]$. Требуется найти решение $F(t, X)$ дифференциального уравнения (1.8), удовлетворяющее заданным значениям $F_k(X)$ и $\Omega_k(X, F_k(X))$, $k = \overline{1, n}$, и проходящее через фиксированные точки $M(t, X)$ области $G = [0, T] \times \{X = (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3) \in R^3; 0 \leq x_1 \leq 1, 0 \leq x_2 \leq 1, 0 \leq x_3 \leq 1\}$ при условии, что t принадлежит промежутку $t_{n-1} \leq t \leq t_n$. Сформулированная задача принимает вид

101

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \Omega(t, F(t, X)), \quad t \in [t_{n-1}, t_n],$$

$$F(t_k, X) = F_k(X), \quad \Omega(t_k, X, F_k(X)) = \Omega_k(X), \quad (1.10)$$

$$F|_T = F(t), \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

Постановка задачи (1.10) существенно отличается от общепринятой постановки современных оперативных гидродинамических моделей прогноза тем, что в последних используются только исходные данные и не применяется информация ни об анализе, ни о прогнозе за несколько предшествующих сроков.

Обозначим $F_1(t, X)$ - многочлен третьей степени, совпадающий с заданными значениями в узлах сетки t_{n-1} и t_n , а $F_2(t, X)$ - многочлен пятой степени, принимающий заданные значения в узлах t_{n-2} , t_{n-1} и t_n

$$F_1(t, X) = \sum_{i=0}^3 a_i (t - t_{n-1})^i, \quad F_2(t, X) = \sum_{i=0}^5 b_i (t - t_{n-1})^i.$$

С помощью метода неопределенных коэффициентов, при этом учитывая уравнение (1.14), получаем

$$\begin{aligned} F_1(t, X) &= \frac{1}{(h_n + h_{n-1})^2} \left\{ h_{n-1}^2 \left[\left(1 + 2 \frac{h_n}{h_n + h_{n-1}} \right) F_n - h_n \Omega_n \right] + \right. \\ &\quad \left. + h_n^2 \left[\left(1 + 2 \frac{h_{n-1}}{h_n + h_{n-1}} \right) F_{n-1} - h_{n-1} \Omega_{n-1} \right] \right\}, \\ F_2(t, X) &= \frac{h_{n-1}^2 (h_{n-1} + h_{n-2})^2}{(h_n + h_{n-1})^2 (h_n + h_{n-1} + h_{n-2})^2} \left[\left(3 + 2 \frac{h_n}{h_n + h_{n-1} + h_{n-2}} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - 2 \frac{h_{n-1}}{h_n + h_{n-1}} \right) F_n - h_n \Omega_n \right] + \frac{h_n^2 (h_{n-1} + h_{n-2})^2}{(h_n + h_{n-1})^2 h_{n-2}^2} \left[\left(1 + 2 \frac{h_{n-1}}{h_n + h_{n-1}} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - 2 \frac{h_{n-1}}{h_{n-2}} \right) F_{n-1} + h_{n-1} \Omega_{n-1} \right] + \\ &\quad + \frac{h_n^2 h_{n-1}^2}{(h_n + h_{n-1} + h_{n-2})^2 h_{n-2}^2} \left[\left(3 + 2 \frac{h_{n-1} + h_{n-2}}{h_n + h_{n-1} + h_{n-2}} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - 2 \frac{h_{n-1}}{h_{n-2}} \right) F_{n-2} + (h_{n-1} + h_{n-2}) \Omega_{n-2} \right]. \end{aligned}$$

Далее строим многочлен $F(t, X)$ степени не выше пять, который удовлетворяет условию

$$F(t, X) = [h_{n-1}F_1(t, X) + h_nF_2(t, X)]/(h_n + h_{n-1}). \quad (1.11)$$

102

Очевидно, что такой многочлен $F(t, X)$ существует и условием (1.11) определен однозначно.

Схема (1.11), как легко проверить, обладает интерполирующими свойствами, т. е. при $t=t_{n-1}$ ($h_{n-1}=0$) и $t=t_n$ ($h_n=0$) выполняются равенства $F(t, X)=F_{n-1}$ и $F(t, X)=F_n$. Следовательно, максимальная погрешность решения задачи (1.10) с помощью метода (1.11) находится внутри интервала $t_{n-1} < t < t_n$ и определяется неравенством

$$|F(t, X) - F(t, X)|_{t \in [t_{n-1}, t_n]} \leq R(t).$$

где $F(t, X)$ - точное решение и $R(t)$ зависит от t . Производная, входящая в остаточный член $R(t)$, сохраняет четвертый порядок при любом t . Следовательно, нет необходимости в удовлетворении дополнительных условий на гладкость функций F и Θ , а в получаемом решении гарантируется отсутствие паразитных осцилляций.

При численном решении задач класса (1.10) полученный интерполяционный метод (1.11) выгодно отличается от существующих классических разностных схем, решаемых пошагово при обязательном соблюдении условий устойчивости, тем, что он однократный, т. е. одно обращение к формуле (1.11) позволяет получить решение задачи (1.10) для любого $t \in [t_{n-1}, t_n]$.

Для мезомасштабных процессов переноса пассивной примеси от точечных источников с характерным поперечным размером облака (факела) в несколько сотен метров изменчивостью метеорологических параметров (скорости, температуры, коэффициента турбулентной диффузии и т. д.) в горизонтальной плоскости можно пренебречь, и в первом приближении считать их не зависящими от x , y . Такое приближение позволяет искать решение задачи переноса пассивной примеси от точечных источников методом разделения переменных. При этом решение в горизонтальной плоскости находится аналитически, а в вертикальной - численно.

2. Результаты численных экспериментов. В качестве исходной информации для метеорологической задачи использовались прогностические значения метеопараметров, передаваемые дважды в день по каналам АСПД в ГМЦ Украины из Лондонского Зонального Центра BRAKNELL в коде GRID, для региона «О» (25N-75N, 00-45E) в узлах сетки 2,5x2,5 град, на срок до шести суток через каждые 12 часов. Передаваемые исходные данные относятся к узлам регулярной широтно-долготной сетки с шагами 2,5° на шести стандартных уровнях: уровень Земли, 850, 700, 500, 300, 100 гПа.

Область решения с размерами 1500x1000 км, включающая в себя территорию Украины, была покрыта горизонтальной сеткой, содержащей 26x26 узлов с шагами 60 км (с запада на восток) и 40 км (с юга на север) и связанной узлом ($j=3$, $i=13$) с сеткой ЛЗЦ BRAKNELL в точке с координатами (45° N, 30° E).

Рельеф местности задавался на более подробной сетке, и затем интерполировался со вторым порядком гладкости в узлы расчетной сетки.

При моделировании развития процессов формирования полей концентрации от точечного источника выброса задавались координаты и физические параметры первичного источника. Область решения определялась в зависимости от постановки частных экологических задач:

прогноз рассеяния примеси в атмосфере в случае аварийных ситуаций;

103

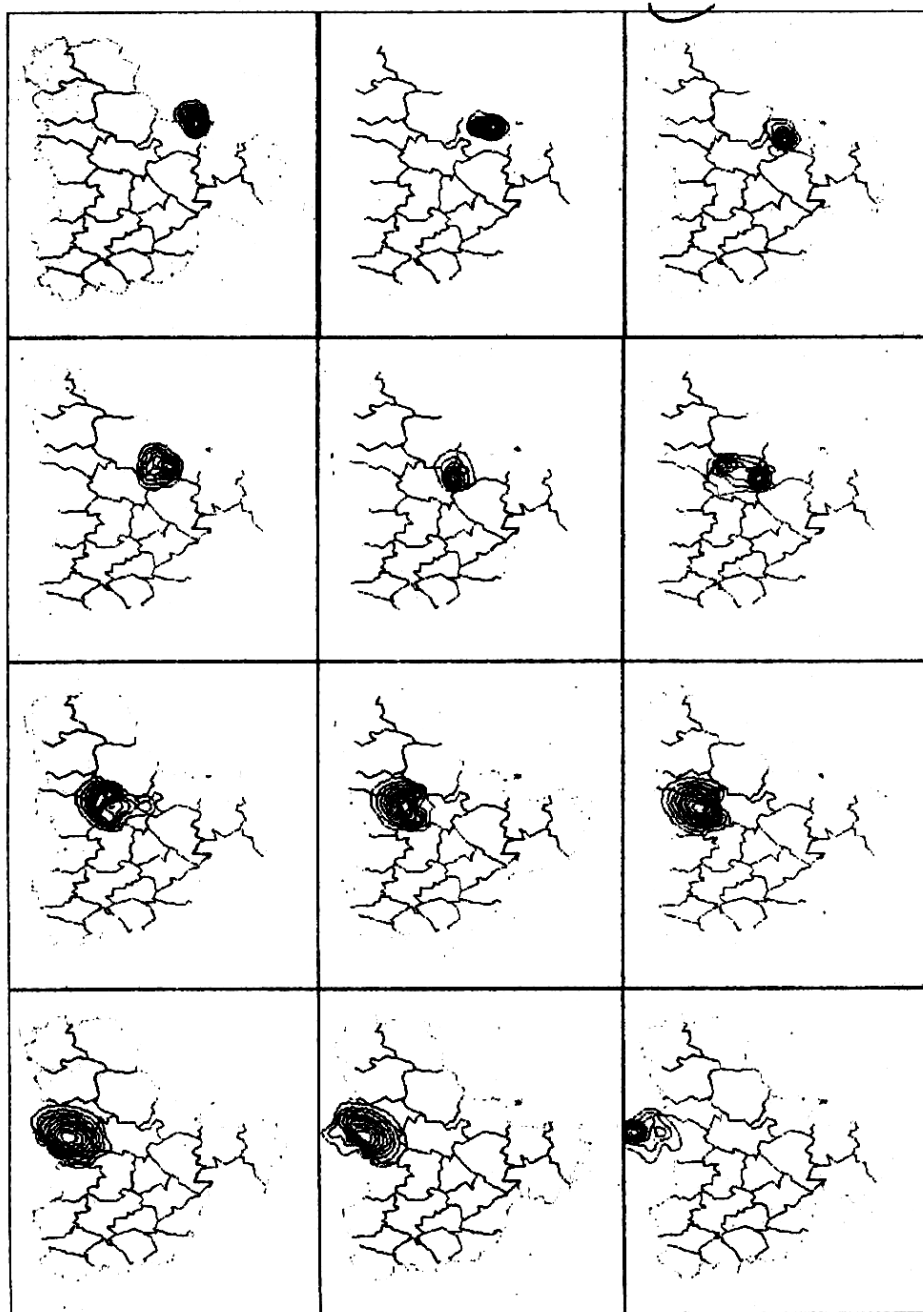


Рис. 1. Картина распространения примеси в результате взрыва на территории Киевской области

прогноз загрязнения атмосферы от промышленных источников;
 прогноз трансграничного переноса загрязнения в атмосфере. Для расчета полей концентраций использовалась сетка с 51х51 узлами.

В качестве примера приведены результаты прогноза концентрации примеси в воздухе от аварийного источника (рис. 1).

С использованием разработанной методики произведен расчет распространения возможного выброса на объекте «Укрытие» в атмосфере и поверхностного

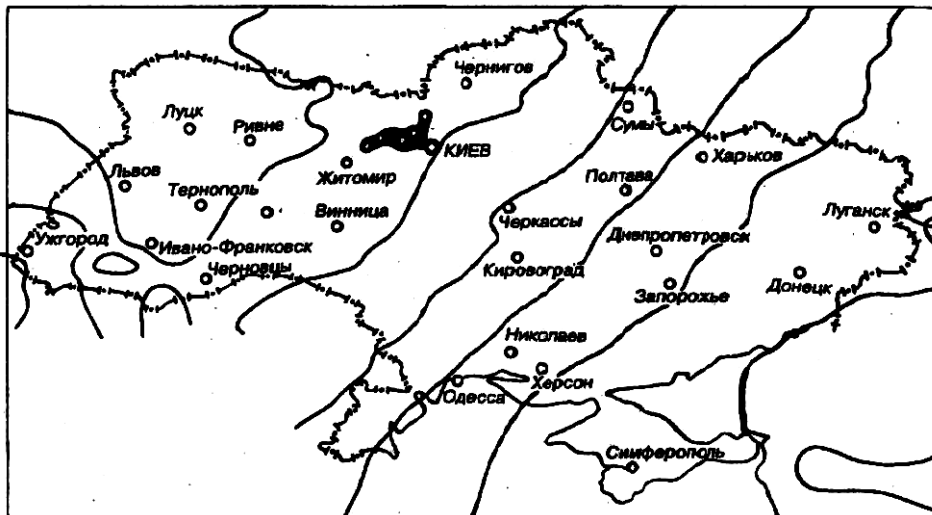


Рис. 2. Приземная карта прогноза

загрязнения от выпадения пылевых частиц по ходу его движения. В расчете было принято, что выброс произошел 7 июля 1995 г. При этом характеристика источника и частиц выброса принята в соответствии с [14].

По своей природе частицы выброса условно делятся на два вида. К первому виду относятся достаточно крупные истинно-топливные частицы со средним медианным диаметром 30 мкм и значением плотности. Ко второму виду относятся мелкодисперсные частицы идентичные аэрозолям, формирующим загрязнение воздуха в помещениях объекта «Укрытие». Они имеют следующие характеристики: средний медианный размер 5 мкм, средняя плотность 6,0 г/см³.

Характер распространения выброса во многом зависит от его высоты. В данном расчете высота выброса определена в соответствии с [15], она составила 62 м от уровня земли.

Результаты выполненных расчетов по оценке распространения выброса через пять дней (на 12 июля 1995 г.) после гипотетической аварии с учетом реальных метеорологических условий приведены на рис. 2. и свидетельствуют о том, что:

- 1) истинно-топливные частицы выброса оседают в существующей тридцатикилометровой зоне;
- 2) мелкодисперсные (аэрозольные) частицы распространяются на расстояние до 150 км от объекта «Укрытие», причем область их распространения и вызванное ими поверхностное загрязнение местности носит ярко выраженный нерегулярный по территории характер (в направлении Чернобыль-Киев до 110 км, а в направлении Житомир-Чернигов до 180 км).

1. *Андерсон О., Таннехил Дж., Плетчер Р.* Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Под ред. Г. Л. Подвидза. - М.: Мир, 1990. - Т. 2. - 726 с.
 2. *Динамика погоды* / Под ред. С. Манабе. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. - 420 с.
 3. *Зилитинкевич С. С.* Динамика пограничного слоя атмосферы. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1970. - 291 с.
 4. *Марчук Г. И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. - М.: Наука, 1982. - 320 с.
 5. *Марчук Г. И.* Методы вычислительной математики. - М.: Наука, 1980. - 535 с.
 6. *Самарский А. А.* Теория разностных схем. - М.: Наука, 1977. - 656 с.
- 105
7. *Сандрем А., Элвиус Т.* Вычислительные проблемы моделирования в ограниченной области // Численные методы, используемые в атмосферных моделях. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. - 2. - С. 274-302.
 8. *Тихонов А. Н., Самарский А. А.* Уравнения математической физики. - М.: Наука, 1977. - 735 с.
 9. *Щец Дж.* Турбулентное течение (процессы вдува и переноса) // Механика. - М.: Мир, 1984. - 244 с.
 10. *Гаевский Х., Греггер К, Захариас К.* Нелинейные операторные уравнения и операторные дифференциальные уравнения. - М.: Мир, 1978. - 336 с.

11. Galperin B., Kantha L., Hassid S., Rosati A. A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows // J. Atmos. Sci. - 45. - 1988. - P. 55-62.
12. Mellor G. L., Yamada T. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers // J. Atmos. Sci. - 31, 1974. - P. 1791-1806.
13. Mellor G. I., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys. - 20, 1982. - P. 851-875.

Получено 11.04.96

УДК 551.515.3

Л. В. Андрощук, Б. П. Иващенко, С. К. Никитин, В. Н. Свешников
**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АВАРИЙНОЙ СИСТЕМЫ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ
ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»**

Оценена эффективность одного из предложенных вариантов аварийной системы пылеподавления объекта «Укрытие». На основе вероятностного подхода анализируется процесс взаимодействия пылевых частиц с каплями пылеподавляющей жидкости. Исследуется движение воздушных масс и взвешенных частиц пыли и капель жидкости с помощью конечноразностного численного метода аэродинамики по явной разностной схеме на основе методики Мак-Кормака. Приведены результаты расчетов эффективности системы пылеподавления для двух значений скорости ветра - 5 и 35 м/с.

Проект системы пылеподавления, призванной уменьшить степень радиационного загрязнения окружающей среды в случае возможного обрушения кровли объекта «Укрытие» (ОУ), включает в себя следующие компоненты. Быстродействующие установки БД-1, автоматически включающиеся через 0,4 с после начала обрушения и за 2 с впрыскивающие по 1 м³ каждая во внутренний объем ОУ еще в процессе разрушения; установки БД-2, начинающие работу одновременно с БД-1 и разбрызгивающие 1 м³ в течение 25-30 с на уровне нынешних верхних отметок ОУ. При этом факелы форсунок, разбрызгивающих жидкость, прикрывают в плане всю площадь ОУ с некоторым запасом; стационарная система (СС), работающая над той же площадью, что и БД-2, но включающаяся только через 60 с и способная распылить 120 м³ в течение 5 мин.

Диаметр капель, разбрызгиваемых установками БД-1 и БД-2, составляет величину порядка 200 мкм; стационарная система (СС) может быть исполнена как в высоконапорном варианте, с таким же диаметром капель, так и в варианте типа дождевальной установки с диаметром капель порядка миллиметра.

Вопрос о том, какое именно количество пыли будет подниматься в воздух, представляет собой весьма сложную проблему, где задачи аэродинамики переплетаются с задачей вовлечения пылинок в потоки воздуха [1-4]. В частности, в работах [1, 2, 4] рассматривался вопрос о количестве пыли, вовлекаемой в движение воздушными массами

© Л. В. Андрощук, Б. П. Иващенко, С. К. Никитин, В. Н. Свешников, 1998

106

при обрушении кровли ОУ. Приведенные в этих работах данные о поднятой пыли - 5 т [1], 300-900 кг [2], 2 т [4] сильно различаются. По существу в той части этих работ, где определяется количество поднимаемой пыли, эти данные представляют собой просто экспертную оценку. Во всех работах полагается, что на долю топлива приходится 1 % массы пыли, а из анализа нуклидного состава топливных частиц [2, 5, 6] следует, что их удельная активность составляет 137,6 Ки/кг. Таким образом, суммарная активность покидающих ОУ веществ оценивается величиной порядка 400-7000 Ки. В данной работе точность этой величины не играет ключевой роли. Основная цель - оценка той доли пыли по сравнению с ее начальным значением, которая будет погашена системой пылеподавления.

В результате возможного обрушения кровли в воздухе будет находиться как поднятая пыль, так и капли пылеподавляющей жидкости. Скорость их осаждения относительно движущихся воздушных масс можно рассчитать на основании формулы Стокса [7]:

$$V = (2/9)R^2 g \rho / \mu, \quad (1)$$

где ρ и R - плотность и радиус частицы, $g=9,8$ м/с² - ускорение силы тяжести, $\mu=1,8 \cdot 10^{-5}$ кг/(м•с) - динамический коэффициент вязкости воздуха.

Капли жидкости, характерные для пылеподавляющей системы, имеют $R=100$ мкм, $\rho=1100$ кг/м³, отсюда находим $V=1,3$ м/с.

Как отмечено в [1, 5], внутри ОУ преобладают частицы пыли размером диаметра порядка нескольких микрон при плотности порядка 6-10 г/см³. По формуле Стокса находим, что скорость оседания частиц пыли в воздухе не превышает нескольких сантиметров в секунду. Пренебрегая этой скоростью по сравнению с приведенной выше скоростью осаждения капель, приближенно считаем, что частицы пыли переносятся с движущейся воздушной средой, а капли жидкости осаждаются по отношению к ней со скоростью 1,3 м/с.

В работе [8] на основе анализа напряженно-деформированного состояния строительных конструкций разработано шесть различных сценариев обрушения, различающихся последовательностью разрушения основных несущих элементов покрытия ОУ. Во всех сценариях происходит падение самого перекрытия на завалы центрального зала на отметках 43-49 м и южных «ключек» кровли, в то время как каскадная и контрфорсная стены не разрушаются. В соответствии с этими сценариями после окончания процесса обрушения бывший внутренний объем ОУ с запада окружен контрфорсной стеной, с востока - конструкциями блока «В», с севера - каскадной стеной, а с южной стороны после обрушения «ключек» оказывается свободным выход в сторону кровли машинного зала.

Полагаем, что по истечении процесса обрушения весь бывший внутренний объем ОУ заполнен воздухом, в котором перемешаны как частицы пыли, так и капли пылеподавляющей жидкости, впрыснутые установками БД-1 еще в процессе обрушения.

Оценим вероятность того, что частица пыли не будет подавлена каплями пылеподавляющего раствора, если мимо нее опускался слой разбрызганных капель малой толщины L , при условии, что объемная концентрация капель равна q , а радиус капель R . Тогда в горизонтальном слое единичной площади количество капель составит величину

$$N=qL/(4\pi R^3/3). \quad (2)$$

107

Прикрываемая каплями в плане площадь равна

$$N\pi R^2, \quad (3)$$

а вероятность частицы пыли быть захваченной каплями, вычисленная как отношение площадей, составляет

$$p = 0,75 q L/R; \quad (4)$$

соответственно вероятность остаться неподавленной равна $1-p$. При осаждении слоя капель конечной толщины x , т. е. x/L слоев малой толщины L , вероятность частицы пыли остаться непогашенной такова:

$$p=(1-0,75qL/R)^{x/L}. \quad (5)$$

Для реальных параметров разбрызгивающих установок величина $0,75qL/R$ является малой, и в соответствии с изложенным выше величина x/L - большой, поэтому из формулы (5) на основании второго замечательного предела вытекает

$$p = \exp(-0,75 q x/R). \quad (6)$$

Поскольку $z=qx$ - толщина слоя осадков для той точки пространства, мимо которой осаждаются капли, формула несколько упрощается:

$$p=\exp(-0,75z/R). \quad (7)$$

Как следует из формулы (7), эффективность пылеподавления увеличивается с уменьшением радиуса капель и с увеличением слоя осадков, выпавших мимо рассматриваемой области пространства.

Значения долей погашенной и непогашенной пыли в области пространства, мимо которой осаждаются капли жидкости, впрыснутой внутрь ОУ установками БД-1 во время обрушения, в зависимости от времени нахождения в орошаемой зоне, приведены в табл. 1. Аналогичные данные для точек пространства, расположенных в зоне орошения установок БД-2, приведены в табл. 2. Как видно из табл. 1 и 2, количество неподавленной пыли быстро убывает с течением времени, причем решающими в процессе связывания пыли являются первые несколько секунд пребывания в зоне орошения. Установки БД-1 обеспечивают слой осадков толщиной 1,65 мм, установки БД-2 - 2,2 мм, и поэтому, если бы поднятая пыль не

покидала границ орошаемой зоны, то после осаждения капель неподавленной осталось бы только ничтожная часть, а именно $5,5 \cdot 10^{-9}$ от первоначального количества поднятой пыли.

Таблица 1. Оценка эффективности аварийной системы пылеподавления объекта «Укрытие»

Время пребывания в орошаемой зоне, с	Доля непогашенной пыли, %	Доля погашенной пыли, %
1	38,0032	61,9968
2	14,4424	85,5576
3	5,4886	94,5114
4	2,0858	97,9142
5	0,7927	99,2073
6	0,3012	99,6988
7	0,1145	99,8855
8	0,0435	99,9565
9	0,0165	99,9835
10	0,0063	99,9937 '

108

Таблица 2. Оценка эффективности аварийной системы пылеподавления объекта «Укрытие»

Время нахождения в орошаемой зоне, с	Доля непогашенной пыли, %	Доля погашенной пыли, %
1	57,7094	42,2906
2	33,3038	66,6962
3	19,2194	80,7806
4	11,0914	88,9086
5	6,4008	93,5992
6	3,6939	96,3061
7	2,1317	97,8683
8	1,2302	98,7698
9	0,7099	99,2901
10	0,4097	99,5903

В естественных условиях такая эффективность может быть не достигнута из-за того, что часть пыли может быть выведена из зоны орошения при движении вместе с воздушными массами, например, вследствие ветра. Для анализа этой задачи используется решение задачи аэродинамики с помощью явной разностной схемы Мак-Кормака [9]. Согласно этой схеме выполняется предварительный расчет функций (шаг предиктор) и уточняющий расчет (шаг корректор). Схема имеет второй порядок точности как по времени, так и по пространству. На шаге «предиктор» для аппроксимации производных в пространстве используются разности вперед, а на шаге «корректор» - разности назад. Разности вперед и назад чередуются как на шагах предиктор - корректор, так и при аппроксимации производных по пространственным координатам. Это ликвидирует несогласованность, обусловленную применением односторонних разностей. Граничные условия выполняются после предварительного расчета функций как на шаге «предиктор», так и на шаге «корректор» [10].

В среднем скорость ветра в районе Чернобыльской АЭС составляет 4,2 м/с, максимальная скорость ветра, ожидаемая один раз в десять тысяч лет, - 47 м/с [11]. Расчеты проводились для двух значений скорости ветра: близкого к среднему - 5 м/с и интенсивному - 35 м/с.

При ветре на процесс движения пылевого облака и на процесс осаждения капель, впрыснутых внутрь ОУ установками БД-1 еще во время обрушения, а также разбрызгиваемых установками БД-2, влияет поле скоростей воздушных масс, возникающее при обтекании сохранившихся строительных конструкций.

Расчетная область задачи состоит из 64 шагов разностной сетки в горизонтальном направлении и 32 шагов сетки по вертикали. Шаг сетки в горизонтальном направлении составляет 3 м, по вертикали - 1,14 м. Направление ветра на рис. 1, 2 представлено слева направо, т. е. с юга на север, при скорости ветра 5 м/с.

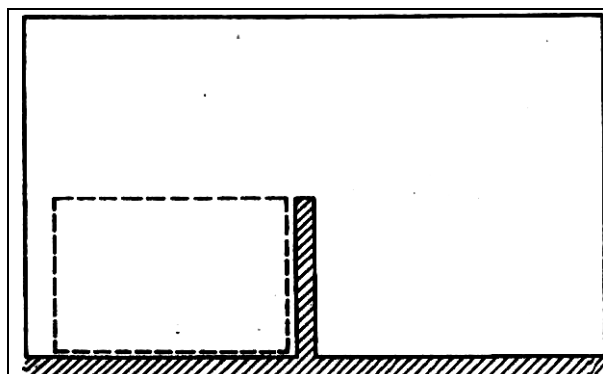


Рис. 1. Расчетная сетка задачи и начальное положение пылевого облака

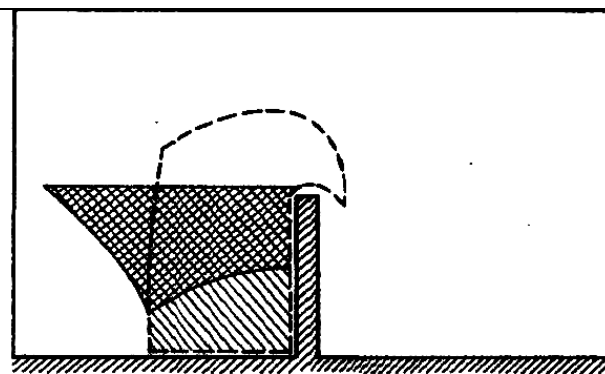


Рис. 2. Схема деформации и движения пылевого облака

109

Препятствие, которое обтекают воздушные массы (рис. 1), моделирует каскадную стену, остающуюся неразрушенной во всех сценариях обрушения кровли.

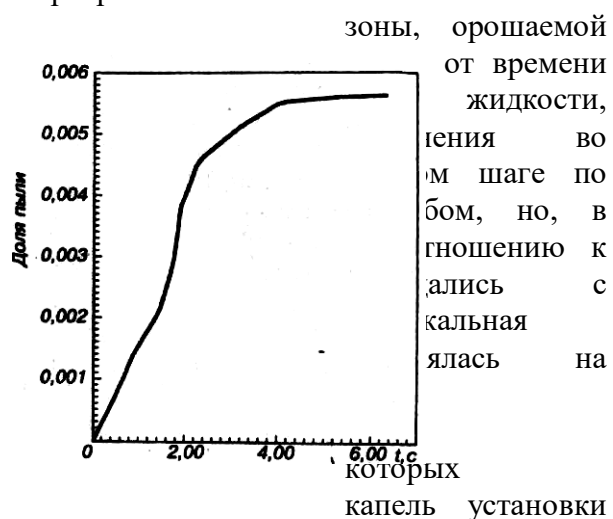
Для того чтобы отследить положение пылевых частиц, в расчетную область в начальный момент времени поместили некоторое количество маркеров, координаты которых могут не совпадать с координатами узлов разностной сетки. На каждом шаге по времени новые значения горизонтальной и вертикальной координат маркера определяли следующим образом: по известным координатам маркера на предыдущем шаге по времени определяли ячейку разностной сетки, в которой он был расположен; маркеру предписывали скорость, рассчитанную методом линейной интерполяции по значениям скоростей в четырех вершинах упомянутой ячейки, после чего по найденным значениям горизонтальной и вертикальной компонент скорости определяли новое положение маркера.

Для того чтобы оценить границы установками БД-2, в расчетную область вводились маркеры, символизирующие разбрызгиваемой установками БД-2. времени координат этих маркеров на времени определялись описанным ранее отличие от частиц пыли, капли жидкости переносящим их воздушным массам приведенной выше скоростью, поэтому компонента скорости маркера капли соответствующую величину.

Капли, впрыснутые установками моделировались маркерами, положение пересчитывалось точно так же, как и для БД-2.

Маркеры пылинок первоначально помещали с некоторым шагом в прямоугольную область (на рис. 1 штриховая линия - начальное положение этой области).

Рис. 3. Доля пыли, покидающая границы орошаемой зоны при южном ветре 5 м/с



Расчеты показали, что наиболее неблагоприятное направление ветра - с юга на север, поскольку в этом случае пылевое облако максимально быстро по сравнению с другими направлениями ветра покидает границы орошаемой зоны. Как видно из рис. 2, деформация и движение занятого пылью объема в этом случае таковы, что набегающим потоком он прижимается к каскадной стене и одновременно выдавливается вверх, через каскадную стену. Область, орошаемая каплями от БД-1, заштрихована реже на рис. 2, область, орошаемая каплями от БД-2, заштрихована гуще.

110

На рис. 1 и 2 видно, что взаимодействие капель и пылевого облака с полем скоростей воздушной среды таковы, что со временем часть пылевого облака покидает пределы орошаемой зоны. Пыль из этой части пылевого облака уже не будет погашена. При решении задачи подсчитывалось время, в течение которого каждая выделенная часть пылевого облака находилась в пределах орошения капель как БД-1, так и БД-2. Результативными с точки зрения подавления пыли являются первые секунды взаимодействия частиц пыли и капель жидкости с воздушным потоком. В частности, на рис. 3 приведен график изменения во времени доли пыли, которая остается непогашенной в течение процесса выхода пылевого облака из зоны орошения, изображенного на рис. 2.

Расчеты показали, что при направлении ветра с юга на север доля непогашенной пыли при скорости 35 м/с составляет 3,5 %, при скорости 5 м/с - 0,6 %, а при направлении ветра с севера на юг доля соответственно 0,4 % и 0,1 %.

1. *Техническое задание на разработку проекта аварийной системы пылеподавления на разрушенных конструкциях объекта «Укрытие».* ТМ-38.776.00.ТЗ. Чернобыль, 1993. - 50 с.
2. *Оценка ядерных и радиационных последствий возможного обрушения кровли «Укрытия»* // С. С. Огородник, Г. А. Шароваров, В. Г. Молодых и др. - Киев-Минск, 1993. - 28 с.
3. *Махонько К. П.* Ветровой подъем радиоактивной пыли с подстилающей поверхности // Атомная энергия. - 72. - 1992. - Вып. 5. - С. 523-531.
4. *Шароваров Г. А., Котович В. В., Молодых В. Г. и др.* Радиоактивное загрязнение территории республики Беларусь при обрушении строительных конструкций 4-го блока ЧАЭС // Вестник АН Беларуси. Сер. физ.-тех. наук. - 1995. - № 1. - С. 37-41.
5. *Кузьмина И. Е.* Экспериментальные исследования дисперсного состава аэрозолей объекта «Укрытие» // Проблемы Чернобыльской зоны відчуження. - 1994. - № 1. - С. 124-128.
6. *Богатов С. А., Боровой А. А., Дубасов Ю. В., Ломоносов В. В.* Форма и характеристика частиц топливного выброса при аварии Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. - 1990. - 69. - Вып. 1. - С. 36-40.
7. *Ламб Г.* Гидродинамика. - М.: Гостехиздат. - 1947. - 684 с.
8. *Чернобыльская АЭС. Объект «Укрытие».* Аварийная система пылеподавления // Отчет по НИР, НИИМБП / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Том 4: Эффективность аварийной системы пылеподавления. - Киев. - 1995. - 180 с.
9. *Флетчер К.* Вычислительные методы в динамике жидкостей. - М.: Мир, 1991. - Т. 2. - 552 с.
10. *Андрощук Л. В.* Динамічна взаємодія вісесиметричних пружних тіл з газовим струменем // Рукопис деп. в ДНТБ України - 25.07.95, № 1853-Ук95.
11. *Описание объекта «Укрытие и требования к его преобразованию.* - Киев : Наук, думка, 1992. - 50 с.

Получено 11.04.96

УДК 539.3+621.039

Ю. В. Верюжский, П. А. Синев, И. В. Алексеев, В. Л. Бродовой, Г. В. Гаврилов
ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС И БАЗА ДАННЫХ
ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»

Рассмотрены цели, задачи и характеристики программно-технического комплекса, разработанного для исследования термомеханических процессов в объекте «Укрытие», моделирования Чернобыльской аварии 1986 г. и потенциально возможных аварий, анализа надежности и безопасности объекта.

© Ю. В. Верюжский, П. А. Синев, И. В. Алексеев, В. Л. Бродовой, Г. В. Гаврилов, 1998

111

Описана структура и назначение баз данных для хранения и систематизации информации, относящейся к объекту «Укрытие». Изложены перспективы развития программно-технического комплекса и соответствующих систем управления базами данных.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема разработки программного продукта для исследования процессов, связанных с Чернобыльской аварией 1986 г. и ее последствиями, возникла при анализе следующих обобщенных задач:

оценить с позиций прикладной механики деформируемых тел прочностные свойства и разработать адекватные модели металлоконструкций реактора и строительных конструкций 4-го энергоблока для реализации с помощью эффективных численных методов (конечных элементов (МКЭ), разностей (МКР) и численно-аналитического метода потенциала (ЧАМП));

про моделировать с учетом динамики развития событий различные версии аварии и получить расчетную картину разрушений 4-го энергоблока;

скорректировать полученные численные результаты на основе их сопоставления с данными натурных обследований доступных конструкций объекта «Укрытие» (ОУ) и проанализировать состояние его конструкций, недоступных для прямых обследований;

дать анализ современного состояния и надежности конструкций ОУ;

наметить версии возможных аварий на ОУ, рассчитать их последствия; разработать программно-технический комплекс (ПТК) и базу данных (БД) для прогнозирования и оценки штатных и экстремальных ситуаций на ОУ на основе оперативного анализа поведения конструкций;

разработать методику и регламентирующие документы, позволяющие использовать программно-технический комплекс в процессе эксплуатации, стабилизации и преобразований ОУ (в том числе, для эффективной ликвидации последствий потенциальных аварий на ОУ, которые могут возникнуть вследствие реализации рисков нарушения существующих барьеров безопасности [1]).

В связи с неопределенностью и неполнотой многих исходных данных, вызванных недостаточной и часто противоречивой информацией о процессе протекания аварии 1986 г., из-за недоступности для натурных измерений и обследований многих помещений ОУ, из-за отсутствия ряда необходимых архивных материалов, разрабатывается программно-технический комплекс, который позволил бы решить поставленные задачи, исходя из двух взаимодополняющих подходов, на основе:

базы данных, в которой находит свое отражение разнообразная архивная и оперативная информация, позволяющая составить представление о существующем состоянии ОУ;

результатов численного моделирования всех этапов преобразования 4-го энергоблока в ОУ, которое выполняется на основании достоверной и полной исходной информации исполнительного типа для 4-го энергоблока и подтверждается результатами сравнения расчетных параметров с данными натурных обследований доступных конструкций ОУ [2, 3].

Анализ представленных задач показывает, что все они включают в себя этап расчета конструкций на прочность, т. е. определение напряженно-деформированного состояния (НДС) сооружения при моделировании объекта.

112

В настоящее время существует большое число промышленных программных комплексов, способных выполнить этап высокоточных исследований конструкций при достаточно полной исходной информации, что регламентируется существующими нормами расчета стандартных объектов. Однако в них отсутствует ряд серьезных компонентов, необходимых для реализации решения поставленных задач для ОУ [4]. Поэтому требуется серьезная доработка этих универсальных ПТК (в случае их наличия в исходных текстах) или разработка собственного ПТК. Выбран второй путь (как более дешевый и позволяющий полнее учесть специфику ОУ), в котором ПТК разрабатывается на базе собственных программных продуктов, имеющих многолетнюю историю [5- 7], и ряда других комплексов, получивших наибольшее распространение в научных исследованиях ведущих фирм [8, 9].

Рассмотрим подробнее постановку алгоритмических задач и особенности программной реализации, которые необходимо учитывать при моделировании поведения ОУ.

Методы исследования. Выбор МКЭ как основного средства численного моделирования конструкций ОУ диктуется современным состоянием инженерной практики [10]. Поскольку построение численной модели ОУ базируется на разделении сложного объема на взаимодействующие составные части, то при изучении локальных эффектов работы конструкций или необходимости рационального учета больших массивных объектов хорошим дополнением к МКЭ является ЧАМП [5, 11]. Поэтому наиболее эффективным аппаратом исследований и анализа предложенных конструкций представляется синтез двух этих методов расчета.

На основе выбранных методов расчета в ПТК реализуются задачи теплопроводности, прочности, устойчивости, термоупругости, термопластичности, надежности и долговечности как компонентов исследований стационарных и нестационарных процессов с учетом различных массовых нагрузок.

В качестве алгоритма реализации используется суперэлементный подход [12], при котором объект разбивается на отдельные суперэлементы (СЭ) - одномерные, плоские, трехмерные. Для каждого СЭ отдельно по выбранному методу расчета формируется система уравнений (СУ), которая затем преобразуется в систему меньшего размера, соответствующую зонам контакта данного СЭ.

Малые СУ для всех СЭ объединяются в общую систему на основе уравнений равновесия и совместимости (или других уравнений), записанных для зон контакта. Из решения общей системы определяются неизвестные функции в зонах контакта. Далее они подставляются как известные величины в ранее полученные системы и доопределяются неизвестные граничные условия и искомые функции на каждом СЭ и по всей области. В ЧАМП объединение СЭ разной размерности выполняется путем сведения СУ для СЭ большей размерности к системам СЭ меньшей размерности на основе интегральных соотношений, связывающих внутренние компоненты с граничными условиями.

При решении нестационарных задач в ЧАМП используются фундаментальные решения, зависящие от времени. Выполняется дискретизация по пространству и времени. В МКЭ используются известные алгоритмы прямого и непрямого интегрирования [10]. В суперэлементном подходе сочетание ЧАМП с МКЭ выполняется на уровне матриц податливости и жесткости. Для их формирования в ЧАМП рассматриваются СЭ,

113

в которых в заранее намеченном числе точек прикладываются единичные нагрузки. Формируется статическая система уравнений с числом правых частей, равным числу точек, умноженному на число функций. Определяются граничные условия для каждого единичного нагружения, а затем определяются коэффициенты матриц податливости и жесткости в точках как функции полных граничных условий и единичного нагружения. Далее используются конечно-элементные алгоритмы расчета.

Неопределенность многих исходных данных привела к идее создания и реализации в ПТИС методики численного моделирования строительных объектов на основе статистических обобщений [13].

Основные особенности методики: исходные параметры, в том числе геометрические характеристики (моменты инерции сечений, модули упругости материала и коэффициенты Пуассона, внешние нагрузки) рассматриваются как случайные величины, законы распределения которых и функции плотности вероятностей считаются заданными; функции плотности вероятностей непрерывных случайных величин преобразуются в ряды распределения при заранее оговоренном числе их возможных значений; коэффициенты при неизвестных и свободные члены разрешающей системы уравнений в общем случае являются случайными величинами, выраженными ил рядами распределения; выходные данные рассматриваются как случайные величины.

При численной реализации детерминированные характеристики исследуемых объектов заменяются статистическими рядами, в которых наряду со значениями величин указываются соответствующие вероятности, что приводит к значительному увеличению числа арифметических операций и требуемого объема оперативной памяти ЭВМ. Поскольку элементами разрешающей системы линейных алгебраических уравнений являются

дискретные случайные величины (ДСВ), то обычные арифметические операции с коэффициентами системы заменяются операциями над массивами, описывающими ДСВ.

Для полного описания ДСВ задаются массивы, содержащие ряд значений вероятностей и скаляров исходных величин. Чтобы избежать чрезмерного увеличения времени счета и требуемой оперативной памяти, при выполнении арифметических операций реализовано ограничение скаляра заданным пределом.

Одним из основных факторов анализа, заложенного в ПТК, является расчет на разрушение. Оценка НДС конструкции по теориям прочности, разработанным для различных материалов, позволяет не только выявить наиболее опасные места в конструкции, но и промоделировать последовательный процесс ее разрушения. В последнем случае реализуется итерационный процесс моделирования запроектной аварии и определения состояния строительных конструкций 4-го энергоблока. Результаты расчета служат теми недостающими исходными данными, которые необходимы для проектирования новых и оценки работоспособности существующих элементов ОУ.

Такая постановка задачи является нетрадиционной для существующих программных комплексов анализа конструкций, в которых расчет ведется до момента разрушения, без получения полной картины состояния объекта после аварии.

Поэтому в ПТК заложена методика расчета на разрушение, основными особенностями которой являются следующие:

задача решается итерационным способом;

114

на каждом шаге итерации определяется НДС объекта с определенными граничными условиями;

выделяются наиболее опасные с точки зрения разрушения элементы;

по определенным пользователем критериям прочности проверяются выделенные элементы;

при выявлении элементов, не удовлетворяющих предъявляемым к ним критериям, производится исключение этих элементов из расчетной схемы, а нагрузки, которые воспринимал данный элемент, в зависимости от их рода и причин возникновения либо перераспределяются по оставшимся элементам и дополняются новыми динамическими воздействиями, либо убираются из граничных условий объекта;

после произведенной корректировки расчетной схемы объекта переходим к следующей итерации;

процесс выполняется до стабилизации изменяющейся расчетной модели, т. е. до тех пор, когда будет достигнуто НДС элементов, удовлетворяющее предъявляемым к ним критериям прочности, или элементы объекта будут разрушены.

Оценка разрушения выполняется по известным в настоящее время методикам, разработанным для различных видов материалов и конструкций [14, 15]. Кроме того, предусмотрена незамкнутость ПТК к дополнительным модулям оценки НДС, в которых могут быть реализованы новые критерии прочности.

При расчетах строительных конструкций из железобетона на разрушающие нагрузки в ПТК реализована известная методика расчета по предельным состояниям, и предоставляется возможность варьирования теорий прочности, критериев оценки разрушения конструкции и расчетных коэффициентов для нагрузок, свойств материала и т. п., которые могут быть определены из специальных экспериментов.

Ввиду характерных особенностей ОУ (в частности, таких, как наличие ядерной и радиационной опасности) программно-технический комплекс не может ограничиваться задачами, традиционными для расчета и проектирования промышленных сооружений. Существует завершающий этап в расчетах, который логически объединяет отдельные инженерные задачи по расчету строительных конструкций, моделированию аварии 1986 г., анализу поведения радиоактивной пыли в ОУ и прочие родственные им задачи. Таким этапом является определение значений функции риска - функционалов текущего состояния объекта, которые отражают усредненное негативное влияние ОУ на окружающую среду.

Рассматриваемый программно-технический комплекс включает в себя реализацию **методики расчета показателей риска**.

Функции риска имеют вероятностную природу [1, 4]. Они содержат две составляющие: вероятностную, подразумевающую вероятность возникновения той или иной аварийной ситуации, и детерминированную, подразумевающую потенциальные негативные последствия. Процессы численного определения двух этих множителей имеют существенные различия.

Для определения детерминированного множителя, входящего в функции риска потенциальных исходных событий, используются все модули данного ПТК, предназначенные для решения детерминированных задач расчета строительных конструкций на прочность и разрушение, подъема пыли и т. д. Ответ данной задачи состоит в детерминистской оценке негативных последствий гипотетической аварийной ситуации.

115

В расчете присутствует значительный человеческий фактор: в основе специализированных задач, выполняемых ПТК, находится сформулированная инженером цель оценки негативных последствий. Последние оцениваются путем сознательного, а не автоматического объединения численных результатов математического расчета.

Природа вероятностной составляющей функции риска считается связанной с математическими показателями надежности ОУ. Возможность пребывания ОУ в различных состояниях, среди которых есть как аварийные, так и безопасные, и характер переходов между состояниями дают основание для моделирования эволюции объекта как марковской цепи с конечным числом состояний.

Потеря ОУ способности выполнять свои функции трактуется в алгоритме как попадание в поглощающие состояния марковской цепи [16]. Определение вероятности этого события за некоторое определенное число шагов по цепи (что соответствует рассматриваемому периоду времени) сводится к преобразованиям над матрицей переходных вероятностей. Наиболее ответственной задачей в прикладном расчете марковской цепи является нахождение (оценка) самих переходных вероятностей. Последние представляют собой вероятности переходов между состояниями объекта, и следовательно, их нахождение требует тщательного изучения природы этих состояний, свойств их устойчивости в малом и большой, с тем, чтобы в математической модели были заведомо предусмотрены только практически реализуемые изменения. Поскольку алгоритмизация процесса оценки переходных вероятностей практически недостижима, в ПТК реализована только обработка марковской цепи с задаваемыми переходными вероятностями и некоторые другие функции.

Выделяются следующие группы переходных вероятностей, различающиеся природой недетерминированности.

Первая группа определяет вероятность возникновения постулируемого исходного события $[\Pi]$; для тех из них, которые имеют природное происхождение, переходные вероятности оцениваются путем статистических обобщений, а для техногенных событий возможно еще уточнение оценки путем моделирования. Различные профилактические мероприятия сдвигают оценку вероятности техногенного события в ту или иную сторону, но мало влияют на ее разброс. Поэтому актуальной задачей, достаточно просто формализованной в ПТК, является оценка влияния разброса задаваемых переходных вероятностей на точность вероятностных оценок риска, или другими словами, оценка обусловленности стохастического оператора рассматриваемой эволюционной модели.

Вторая группа переходных вероятностей определяет возможность развития аварийной ситуации как следствия исходного события. Такая возможность зависит от показателей прочности объекта, понимаемых как способность сопротивляться воздействиям разной природы. Недетерминированность этой группы событий связана либо с неполнотой информации об объекте, либо с математической неустойчивостью рассматриваемого явления. Оценка этих переходных вероятностей вырабатывается на основе расчета ряда детерминированных моделей по сценариям развития аварии с варьируемыми параметрами, что фактически не требует дополнений к существующим модулям ПТК. Данный вид неопределенности, а с ним и соответствующие переходные вероятности, исчезает с

уточнением информации об объекте (заполнением баз данных) и с увеличением точности численного моделирования.

116

Третья группа переходных вероятностей задает аспект вмешательства (управления аварийной ситуацией либо ликвидации последствий). Она является интегральной вероятностной характеристикой эффективности защитных систем и барьеров безопасности. Проектирование таких систем, и тем более регламентирование действий человека, редко позволяет осуществить конструктивную вероятностную оценку, поэтому вероятности этой группы носят экспертный характер.

Внесение дополнительных возможностей, таких, как учет эволюционирования свойств системы в ПТК, приводящий к нестационарному характеру марковской цепи, осуществляется путем задания зависимости некоторых из переходных вероятностей от шагов по времени. Как в нестационарном, так и в стационарном случае, прогноз вероятностных показателей на некоторый срок вперед технически не усложняет задачу.

Так же осуществляется в ПТК анализ эффективности профилактических мероприятий: путем изменения переходных вероятностей, пересчета цепи с новыми свойствами и сравнения показателей риска с предыдущими.

Центральной информационной частью методики исследования конструкций объекта «Укрытие» (ОУ) и доаварийного состояния 4-го энергоблока является база данных (БД), в которой в формализованном виде хранится и накапливается динамическая информация об объекте.

На содержательном уровне информация делится на основные группы: общая информация; конструкторско-технологическая документация; нормативные и экстремальные нагрузки; механическая модель несущих конструкций; дискретное отображение напряженно-деформированного состояния (НДС) механической модели; данные для оценки надежности ОУ. Эта информация входит в состав разрабатываемой общей базы данных ОУ [1, 4].

Общая информация по своему физическому и техническому содержанию разнородна и характеризует ядерное, радиационное и общетехническое состояние возведенного ОУ, прилегающей территории и гидрогеологической среды. Она используется при анализе сценариев за- проектной аварии, оценке надежности ОУ и выработке мер по его стабилизации, при выработке вариантов превращения ОУ в экологически безопасную систему и т. п. Однако существующие данные о состоянии ОУ хранятся в разрозненном виде и, в основном, на бумажных носителях, от чего их ценность и возможность использования существенно снижаются.

На данном этапе работ проведена систематизация вспомогательной информации и выделены следующие направления, развиваемые и реализованные в БД:

- состав и результаты экспертизы архивных материалов по ОУ для выявления и компьютеризации исходной информации, необходимой для реализации целей построения ПТК;

- радиационная обстановка в помещениях ОУ за весь период времени, прошедший после аварии, с данными об измерениях мощности экспозиционной дозы;

- расположение и конфигурации лавообразных топливосодержащих масс (ЛТСМ);

- химический и радионуклидный состав проб ЛТСМ, аэрозолей, воды, которые были отобраны в ОУ;

- расположение датчиков контролирующих систем ОУ со справочной и накапливаемой информацией;

117

- расположение фрагментов топлива;

- наличие горючих материалов в помещениях ОУ, являющихся потенциально пожаро- и взрывоопасными; расположение реакторного графита;

- расположение и характеристика скважин в ОУ, с полученными в них данными;

- конфигурация помещений в ОУ в их назначение до и после аварии; систематизация фото- и видеоматериалов с информацией о съемках, проведенных в объекте «Укрытие»;

исходные данные о ядерной опасности, предназначенные для определения ядерной безопасности композиций ЛТСМ;

данные о радиационной опасности, предназначенные для хранения информации о содержании суммарной активности в ОУ

Конструкторско-технологическая информация об объекте исследования включает в себя графические прототипы узлов и элементов конструкции; графические прототипы условных обозначений и инструкции по их размещению на планах, разрезах и развертках; дискретное представление полей (наплывов бетона, уровней радиации и др.), величины которых отображаются при графическом выводе результатов.

Дискретные представления полей температур, напряжений, деформаций, перемещений, скоростей, ускорений, коэффициентов запаса прочности и других компонентов формируются программными средствами перед выводом на устройства графического или цифрового вывода.

Нагрузки и воздействия формализуются и заносятся в базу данных для определения этапов развития всех исследуемых процессов, включая в себя действующие нормативные нагрузки и диапазоны их изменения; экстремальные динамические нагрузки (взрыв, сейсмика, торнадо, термический импульс) и способы их передачи на несущие конструкции объекта; расчетные сочетания нагрузок.

Представление механической модели несущих конструкций выполняется через описание подсистем разных уровней, в которых выделяются базовые элементы. За базовые элементы принимаются панель, колонна, ригель, массив бетона и т. д., которые характеризуются регулярностью геометрических и физико-механических характеристик. В качестве подсистем первого уровня приняты стеновая панель с колонной, плиты перекрытия помещения с ригелями и т. д. Перекрытия и стены этажа определяются как подсистемы следующего уровня. Кроме принципа укрупнения, информационная модель включает в себя принцип детализации. Так, если в панели появились сквозные трещины в бетоне, а арматура еще не разрушена, то она определяется как подсистема, состоящая из неразрушенных частей панели с определением условий их соединения. Аналогично железобетонный элемент может быть представлен как подсистема, где элементы - арматурные стержни и бетон. Уровень детализации определяется необходимой степенью подробности описания наиболее ответственных конструктивных узлов и элементов и может изменяться в процессе наполнения БД.

При формировании механической модели объекта описывается геометрия элементов конструкции, физико-механические характеристики материалов, подсистемы, включающие определение положения элементов конструкции в пространстве и условия их соединения. Кроме того, задаются инструкции по дискретизации элементов конструкции, сборке элементов в подсистемы, укрупнению подсистем включением новых элементов и подсистем, формированию глобальной расчетной модели.

118

Дискретное отображение НДС модели включает в себя: критерии оценки напряженного состояния элементов конструкции; критерии оценки деформированного состояния элементов конструкции; формализованные методики прогноза поведения (возможные степень и характер разрушений) элементов конструкции при достигнутом уровне и характере распределения напряжений и деформации; информацию о НДС объекта исследования; результаты оценки НДС и прогноза поведения элементов конструкции в виде полученных возможных сценариев развития разрушений.

Базовыми исходными **данными для оценки надежности ОУ** служат следующие источники информации: нормативные документы, в которых постулированы частоты (вероятности) потенциальных исходных событий и нормированы интенсивности их воздействий; статистические данные о внешних событиях (климатических, сейсмических) в районе ОУ; информация детерминированного характера о физико-механических свойствах структурных элементов ОУ; выполненные ранее оценки надежности отдельных структурных элементов ОУ; статистика инцидентов, классифицируемых как постулируемое исходное

событие, которые произошли за время существования ОУ; данные о максимальных воздействиях, которые выдержал ОУ.

Имеющиеся сведения позволяют выполнить первичную оценку уровня риска и показателей надежности ОУ, хотя и со значительным разбросом между наиболее консервативными и наиболее оптимистическими оценками.

Для автоматизированного обслуживания ПТК и БД формируется набор специализированных программных средств, обеспечивающих интерфейс с пользователем и вычислительными процессорами. Состав и назначение этих средств определяются составом решаемых задач, из которых основными являются формирование и обслуживание расчетной модели, подсистемы «нагрузки», подсистемы анализа НДС и прогнозирования поведения элементов конструкций, подсистемы графического отображения и документирования.

Основными функциями разрабатываемой **системы управления БД (СУБД)** являются: наполнение базы данных, хранение и сортировка информации, выдача информации по запросам вычислительных программных модулей, архивирование промежуточных состояний процесса моделирования.

В соответствии с задачами, поставленными перед БД, на начальном этапе работы была выбрана СУБД MS ACCESS 2.0. Достоинствами данной СУБД является простота создания интерфейсов, автоматическая поддержка целостности БД, а также встроенное архивирование данных.

Требования к аппаратуре и системному ПО: IBM PC/AT совместимая ЭВМ с процессором Intel 486 и выше; минимальный объем оперативной памяти - 8М; минимальный размер дисковой памяти - 100М; операционная система MS DOS 6.0 и выше с MS WINDOWS 3.1 и выше; среда разработки оболочки - MS ACCESS 2.0; среда исполнения приложения - MS ACCESS 2.0 или MS ACCESS RUN TIME LIBRARY.

База данных и оболочка может использоваться как в однопользовательском, так и в сетевом многопользовательском режиме. Возможен импорт и экспорт информации в другие форматы баз данных и связывание данной базы с другими оболочками в MS ACCESS и других СУБД в рамках ODBC доступа.

119

Перспективы развития БД. Поскольку объемы хранимой информации уже сейчас измеряются гигабайтами и постоянно возрастают, возможности выбранной нами СУБД MS ACCESS в будущем исчерпаются. Данный выбор был обусловлен как техническими характеристиками продукта, так и условиями разработки на начальном этапе. Следующий этап создания БД предполагает переход на качественно более мощную платформу, как аппаратную, так и программную. Ведутся разработки, основанные на использовании UNIX системы с развитой системой коммуникаций и СУБД SYBASE System 10.

Общая характеристика ПТК. Жизнеустойчивость ПТК обеспечивается сильно развитой модульной структурой, перспективностью применяемых методов расчета и реализацией на алгоритмических языках высокого уровня (СИ, ФОРТРАН, ПАСКАЛЬ), имеющих широкое распространение на всех типах ЭВМ. Наиболее сложной является организация входных и выходных данных, которые предметно-зависимы как от типа используемых ЭВМ, так и от вида операционной системы. В связи с этим разрабатываемые модели интерфейсных блоков ПТК предусматривают использование наиболее распространенных и перспективных ЭВМ и операционных систем: ЭВМ серии IBM PC и совместимые с ними ЭВМ других фирм, операционные среды: MS DOS, UNIX, OS-2.

Незамкнутость ПТК по отношению к новым классам задач расчета достигается путем оформления пакетов программ, реализующих эти задачи, в самостоятельные ветви-разделы, при этом согласуются структуры входных, промежуточных и выходных данных.

Размеры решаемых задач ограничиваются ресурсами используемых технических средств, размерами оперативной и внешней памяти.

ПТК состоит из подсистем-блоков, каждый из которых предназначен для решения самостоятельной проблемной задачи, связанной с оценкой НДС конструкций 4-го энергоблока и ОУ. Все блоки связаны общей структурой информации, которая хранится в единой БД. Управление вычислительным процессом сосредоточено в оболочке управления,

которая и объединяет все блоки в совокупности с базой данных в единый программный комплекс. При этом каждый блок на этапе его отработки функционирует как отдельный программный продукт и имеет свое узкое предназначение.

Укрупненную блок-структуру ПТК можно представить следующим образом:

блок управления вычислительным процессом осуществляет управление ходом решения задачи, последовательно вызывая программные блоки;

блок задания исходных данных производит полное определение всех параметров, необходимых для решения задачи: реализует разбивку конструкции на фрагменты, а фрагментов - на элементы (конечные или граничные), формирует задание геометрических данных, физико-механических и жесткостных характеристик, граничных условий, внешних воздействий и др.;

блок обработки, контроля и отображения данных систематизирует исходные данные, производит их анализ, а также выдает данные (исходные и конечные) по выбору пользователя на то или иное отображающее устройство;

блок формирования и решения системы линейных (нелинейных) уравнений равновесия в соответствии с принятой схемой алгоритма исследования напряженно-деформированного состояния пространственных комбинированных конструкций проводит непосредственное решение системы уравнений;

120

блок контроля и диагностики поведения реальных конструкций в процессе их эксплуатации обрабатывает и анализирует фактическое напряженно-деформированное состояние конструкций;

блок анализа результатов выполняет сравнительный анализ и экспертные оценки выполненных расчетов и данных диагностики;

блок выработки и оценки рекомендаций, анализа последствий принятых решений с построением анимационных изображений поведения реальных и проектируемых конструкций.

1. *Отчет по безопасности (оценка рисков) 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.*

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. *Исследование состояния опорных конструкций балок укрытия Б1, Б2 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.*

4. *Исследование и численное моделирование надежности ответственных конструкций, фунтов и грунтовых вод основания объекта «Укрытие» // Отчет го НИР, МНТЦ «Укрытие» по теме 1.1 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский. - Кн. 4: Начальная стадия аварии Чернобыльской АЭС. Расчет металлоконструкций и технологического оборудования реактора на эксплуатационные и предельные аварийные нагрузки. - № ГР 0195U003875. - Чернобыль - Киев, 1995. - 380 с.*

5. *Расчеты и испытания на прочность. Метод интегральных уравнений и программы расчета на ЭВМ плоских и пространственных элементов конструкций. - Рекомендации Р50-54-43-88 / Руководитель разработки Ю. В. Верюжский. - М., 1988. - 105 с.*

6. *Верюжский Ю. В., Вусатюк А. И., Петренко А. Я., Савицкий В. В. Пакеты прикладных программ «Потенциал» для прочностных исследований машин и сооружений (Application Program Pack «Potential» for Strength Analysis of Machines and Structures). - К.: Внешторгиздат, 1983.*

7. *Верюжский Ю. В. Расчет пространственных и плоских элементов конструкций на основе решения граничных задач механики твердых деформируемых тел по методу потенциала // Докл. VIII Междуна. конгресса о применении математики в технических науках. - Веймар, 1978.*

8. *Руководство пользователя к вычислительному комплексу «COSMOS». Метод конечных элементов. - Ленинград, 1990. - 1525 с.*

9. *Руководство пользователя вычислительным комплексом SCAD: НПП «Топаз-Информ», Киев, 1996. - 528 с.*

10. *Бате К., Вилсон Б. Численные методы анализа и метод конечных элементов. - Москва: Стройиздат, 1982. - 448 с.*

11. *Верюжский Ю. В. Численные методы потенциала в некоторых задачах прикладной механики. - К.: Вища школа, 1978. - 182 с.*

12. Верюжский Ю. В., Кандирал-Синева В. А., Синева П. А. Алгоритм расчета составных объектов численно-аналитическим методом потенциала // Киев. ин-т инженеров гражданской авиации. - Киев, 1991. - 32 с. (Рукопись депонирована в УкрНИИТИ 18.08.91 г. Деп. в 1998. - Ук91).
13. Аугусти Г., Барата Дж., Кашиати Э. Вероятностные методы в строительном проектировании. - М.: Мир, 1988. - 562 с.
14. Металлические конструкции: Справочник проектировщика / Под ред. Н. П. Мельникова. - М.: Стройиздат, 1980. - 776 с.
15. Голышев А. Б., Бачинский В. Я., Полищук В. П. и др. Проектирование железобетонных конструкций: Справочное пособие / Под ред. А. Б. Голышева. - К.: Будівельник, 1985. - 496 с.
16. Кемени Дж., Снелл Дж. Конечные цепи Маркова. - М.: Мир, 1984. - 213 с.

Получено 11.04.96

121

УДК 621.039

Ю. В. Верюжский, В. М. Бурлаков, В. В. Гажиенко, И. И. Заруднев, Г. Е. Соколов
**ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, ИНФОРМАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И СОСТОЯНИЕ
РАЗРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ
В ИНТЕРЕСАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ
ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ» И ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЫ**

В статье описаны поисковые работы по созданию автоматических систем контроля на основе радиолокационной техники, направленных на обеспечение безопасности объекта «Укрытие» (ОУ) и Чернобыльской зоны. Описаны результаты проектирования трех систем. Первая - автоматическая радиогеодезическая система измерения перемещений балок покрытия ОУ. Вторая - радиотехническая система дистанционного обнаружения возникающих в зоне пожаров, работающая по принципу многоканальной радиотеплопеленгации. Третья - комбинированная система дистанционного зондирования подповерхностных сред, предназначенная для обнаружения топливосодержащих масс.

Состояние объекта «Укрытие» (ОУ) и прилегающей к нему промплощадки требует постоянного контроля процессов деформации строительных конструкций и процессов перераспределения радиоактивных веществ внутри ОУ и на промплощадке. Дать эти данные могут лишь системы автоматического контроля, способные работать в местах с большим уровнем радиации.

Здесь описаны исследования по созданию автоматических систем контроля на основе радиолокационной техники.

В течении 1995 г. НИИ механики быстропротекающих процессов при КМУГА выдвинул ряд технических предложений по разработке и изготовлению нескольких радиолокационных и радиометрических систем по обеспечению безопасности ОУ. Эти технические предложения можно условно разбить на три группы по признаку метода технического решения поставленной задачи.

1. Радиолокационная система контроля за перемещениями опор балок покрытия объекта «Укрытие». В настоящее время проводится разработка автоматической системы контроля за перемещениями опор (СКПО) балок Б1, Б2 покрытия ОУ. Одновременно создается программно-технический комплекс (ПТК) анализа напряженно-деформированного состояния и оценки несущей способности конструкций ОУ, ядром которого будут программно-информационные средства численного моделирования.

Регистрируемые СКПО перемещения трансформируются средствами ПТК в поля напряжений, которые сопоставимы с прочностными характеристиками конструкционных материалов. Это позволяет оценивать состояние конструкций ОУ по объективным критериям допустимости, отсутствующим для перемещений.

В рамках создания ПТК проведено численное моделирование перемещения опор главных балок покрытия ОУ при различных климатических воздействиях. Анализ показал, что система автоматического контроля за этими перемещениями должна обладать точностью 1-2 мм и динамическим диапазоном 20-30 мм [1].

Требования, предъявляемые к системе контроля за перемещениями опор балок Б1, Б2 покрытия ОУ, усложняются тем, что перемещения должны фиксироваться в абсолютной

системе координат, поскольку на объекте, претерпевшем аварию, нельзя выбрать часть конструкции, которую можно принять за условно неподвижную систему отсчета.

© Ю. В. Верюжский, В. М. Бурлаков, В. В. Гажиенко, И. И. Заруднев, Г. Е. Соколов, 1998

122

В качестве решения такой сложной задачи было предложено построить на объекте «Укрытие» и прилегающей к нему промплощадке радиогеодезическую сеть методом трилатерации на основе радиолокационных дальномеров, зафиксированных в узлах сети, что позволит полностью автоматизировать процесс слежения за общими деформациями опор балок покрытия ОУ.

Узлы трилатерационной сети приведены на рис. 1. Здесь узлы А1-А3, В1-В3 расположены на крыше блока В, узлы С1-С3, D1-D3 размещены на земле. Эти точки являются опорными в сети, т. е. при деформациях ОУ их координаты в абсолютной системе координат (связанной с землей) не меняются. На рис. 1 все координаты представлены по локальной строительной сетке. Узлы А4-А6, В4-В6, С4-С6 и D4-D6 размещены на поверхности ОУ. Они не являются неподвижными в абсолютной системе координат и совершают определенные перемещения при деформациях ОУ. Узлы сети А7, В7, С7, D7 размещены на контролируемых опорах балок В1, В2 внутри ОУ; точка А7 - на внешнем краю верхней части южной вентиляционной шахты; точка В7 - на внешнем краю верхней части северной вентшахты; точка С7 - на западном краю опалубки, в верхней ее части; точка D7 - в верхней части опорного узла на стене по оси 50.

Проведено моделирование системы определения координат точек на опорах (А7, В7, С7, D7) в данной трилатерационной сети, которая распадается на четыре независимые части и в которой измерения проводятся без избыточности. Анализ проведен по следующему методу. В схеме расчета координат контролируемой точки по координатам опорных точек и 12 базовых расстояний варьировались величины базовых расстояний (как результат погрешностей в их измерении). При этом вариации расчетных координат контролируемой точки, характерные для выбранной трилатерационной сети, были ошибочными.

Результат анализа показал, что при оптимальном размещении узлов сети погрешность определения координат dx , dy , dz точки на опоре балок В1, В2 такова:

$$\max(dx, dy, dz) \text{ мм} = 3 \cdot dL \text{ мм},$$

где dL - погрешность в определении базовых расстояний. Отсюда следует, что величина L должна быть порядка 0,5.. 1 мм. Диапазон изменения базовых расстояний составляет 20-30 мм.

Таким образом, автоматически измеряя 48 базовых расстояний в данной трилатерационной сети с помощью радиодальномеров, мы получаем возможность автоматически измерять перемещения опор балок В1, В2 относительно абсолютной системы координат.

Радиолокационный дальномер измеряет расстояние между раскрывом приемопередающей антенны и отражателем электромагнитной волны с точностью 1 мм. Для измерения базового расстояния между двумя точками необходимо в одной точке закрепить отражатель, а в другой - антенну дальномера. В разрабатываемой радиогеодезической системе в качестве отражателей предложено использовать уголкового отражатели. Они размещаются в контролируемых точках А7, В7, С7, D7 и в опорных А1-А3, В1-В3, С1-С3, D1-D3.

В каждой из точек на поверхности ОУ А4-А6, В4-В6, С4-С6, D4-D6 размещаются по четыре дальномера, жестко соединенных между собой в конструктив, так что антенна каждого дальномера излучает волну в направлении на свой отражатель: три антенны - на

123

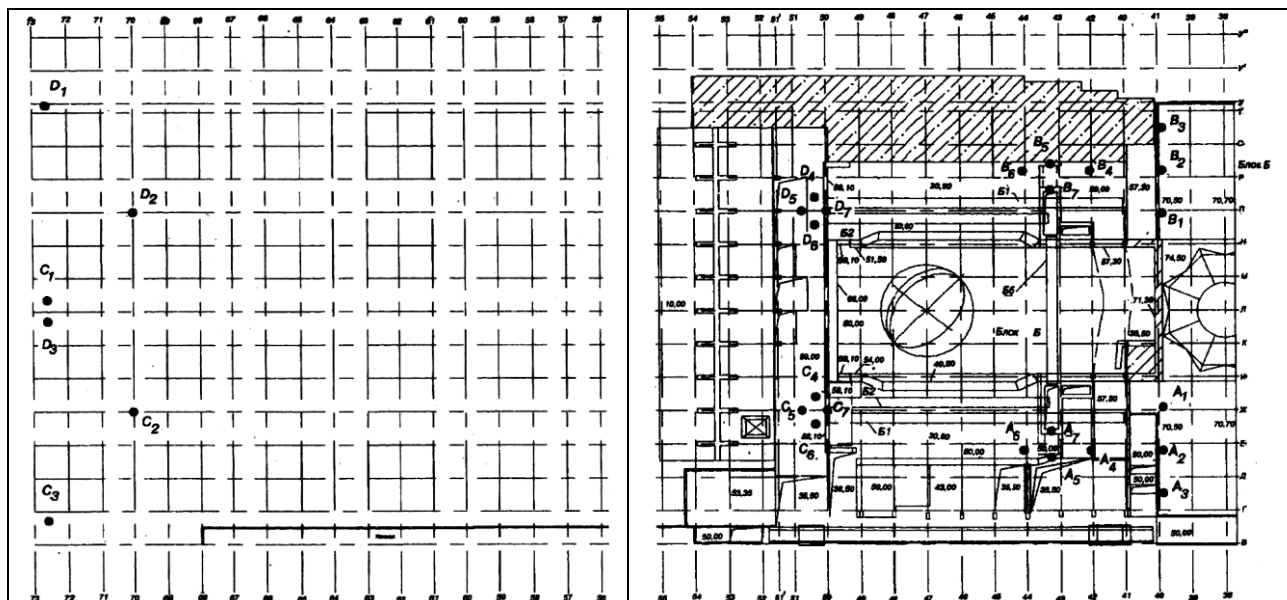


Рис. 1. Размещение СКПО на ОУ:

1 - контрфорсная стена; 2 - лестничная клетка; 3 - стальная опора; 4 - мамонт; 5 - бетонная опора;
6 - каскадная стена; 7 - опалубка

124-125

базовые точки и одна - на контролируемую. По сути, на каждой из 12 точек расположен четырехканальный датчик расстояний от этой точки до четырех других, при этом углы между направлениями от этой точки до четырех других задаются конструктивом четырехканального датчика.

У каждого из 12 четырехканальных датчиков одна из четырех антенн помещается внутрь ОУ через отверстие в металлическом листе покрытия. Конструкция датчика должна предусматривать уплотняющую манжету, предотвращающую выход радиоактивной пыли за пределы ОУ.

Прорабатывается возможность двух вариантов радиогеодезической системы. Первый вариант основан на радиолокационных дальномерах, измеряющих абсолютное базовое расстояние около 100 м с точностью 1 мм. В качестве выходного параметра здесь используются абсолютные координаты контролируемой точки (еще ни о чем не свидетельствующие). Изменение этих координат во времени дает нам информацию о деформационных перемещениях опор балок Б1, Б2. В этом случае точность измерения расстояния $dL/L=0,00001$ требует весьма дорогих локационных датчиков, однако стоимость эксплуатации системы уменьшена, так как она допускает произвольное включение и выключение, не нуждаясь при этом в дополнительной настройке.

Второй вариант радиогеодезической системы основан на радиолокационных дальномерах, измеряющих изменение базового расстояния, которое составляет 30 мм, с точностью 0,5 мм. В качестве выходного параметра системы применяются непосредственные деформационные перемещения опор балок Б1, Б2. В этом случае локационные датчики намного дешевле, однако эксплуатационные расходы выше, поскольку радиогеодезическая система должна постоянно работать. Настройка при включении длительна, требует измерения абсолютных величин базовых расстояний другими приборами; при повторном включении системы процесс настройки должен повторяться.

Разработаны макеты обоих вариантов радиолокационных дальномеров (для двух вариантов системы). Первый вариант - это частотный радиолокационный дальномер, работающий на частотах 35,85-36,15 ГГц. Градуировка данного нестандартизированного средства измерения производится в координатах «длина-напряжение».

Второй вариант дальномера - это фазовый радиолокационный датчик перемещений, работающий на частоте 37,5 ГГц. Градуировка данного нестандартизированного средства измерения производится в координатах «перемещение-напряжение» в пределах длины волны и кратной ей величин.

124-125

Калибровка и испытания обоих макетов проводились на специализированном рабочем месте в НИИ механики быстропотекающих процессов. Базовые расстояния при испытаниях выбирались в пределах 10 м. Измеритель дальности определял эти расстояния с погрешностью 1 см по сравнению с измерением, проведенным стальной рулеткой. Измеритель перемещений фиксировал перемещения 0,5 мм по сравнению с измерением, проведенным стальной линейкой.

Проведенные испытания показали, что данные макеты могут быть основой для разработки опытного образца радиогеодезической системы наблюдения перемещений опорных узлов балок Б1, Б2 объекта «Укрытие».

2. Радиотехническая система дистанционного обнаружения возникающих пожаров. Обнаружить пожары объектов, зданий, участков леса и земельных угодий на ранней стадии их возникновения, точно определить координаты очагов пожаров и оперативно оповестить соответствующие службы можно с помощью надежной радиотехнической системы.

Она состоит из трех разнесенных на территории тридцатикилометровой зоны измерительных пунктов (одного центрального и двух вынесенных) устройств связи и оповещения. В каждом из измерительных пунктов осуществляется круговой обзор пространства и пеленг очагов возгорания. Получаемая при этом информация передается на центральный пункт, где определяются координаты очагов, интенсивность и другие характеристики пожаров.

В измерительной аппаратуре пунктов реализован радиопеленгационный метод, сущность которого сводится к следующему. Все физические тела (участки земной поверхности, здания, дороги, лес и т. д.) излучают электромагнитные волны, интенсивность которых зависит от термодинамической температуры и электрофизических свойств поверхности объектов. Радиотехническая аппаратура с помощью узких лучей способна воссоздать радиояркий «портрет» просматриваемых поверхностей. При возникновении пожаров (даже на ранней стадии) поверхности, маскирующие очаги, нагреваются, т. е. становятся радиоконтрастными, что фиксируется аппаратурой.

Данный метод давно известен, он широко используется в радиоастрономии, исследовании земной поверхности со спутников, в военной технике (при наблюдении воздушных целей с земли и наземных с воздуха). Однако простая реализация этого метода в Зоне отчуждения по проведенным расчетам оказывается неприемлемой по следующим причинам. Во-первых, возгорающиеся объекты наблюдаются под малыми углами, в результате чего фон естественных излучений земной поверхности оказывает значительное маскирующее влияние. Во-вторых, известные способы радиотеплолокации (при ограничениях на стоимость аппаратуры) не гарантируют приемлемую точность определения координат объектов исследования. В-третьих, возникает необходимость обеспечения значительных коэффициентов некогерентного накопления сигналов, что порождает трудности технического характера.

Авторами статьи разработан способ многоканальной радиотеплопеленгации слабоконтрастных объектов, позволяющий успешно использовать его в условиях Чернобыля. При разработке данного способа обобщен опыт по разработке такой многоканальной системы, как цифровая антенная решетка (в части обеспечения

значительного динамического диапазона трактов и большого коэффициента накопления сигналов), а также обработки сигналов в условиях их аномальных искажений.

Укрупненная структурная схема предлагаемого многоканального радиотеплопеленгатора изображена на рис. 2. Схему предполагается реализовать в миллиметровом или сантиметровом диапазоне. Основное преимущество схемы - высокая эффективность: точность пеленгов не хуже 15 угловых минут, схема фиксирует возрастание температуры объектов на единицы градусов при их размерах 10х10 м, обеспечивая дальность действия измерителя в пределах 10-30 км при высоте используемой вышки 30 м и более. Эти характеристики достигаются при приемных каналах с коэффициентом шума порядка 1-2 дБ.

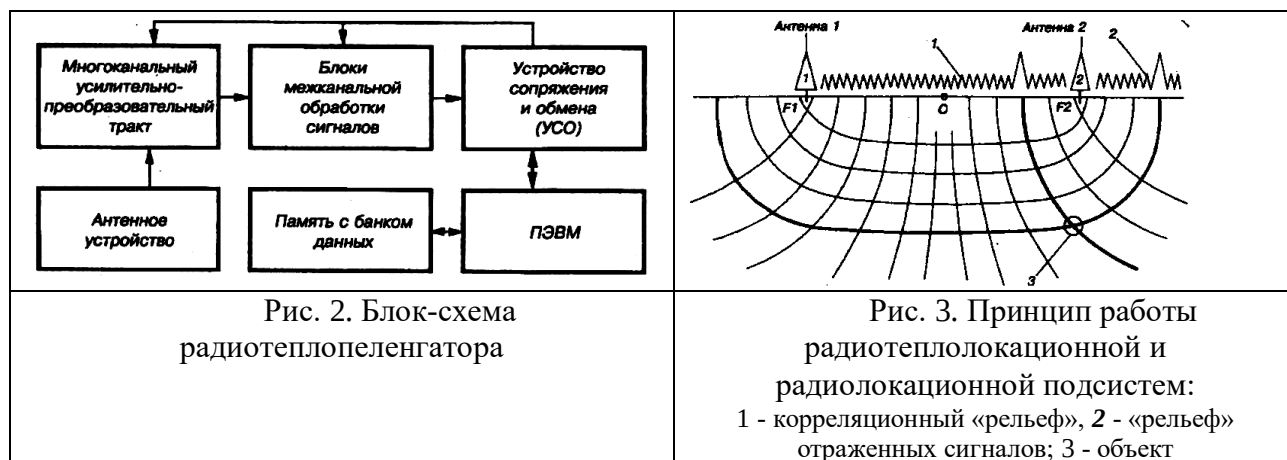
В настоящее время имеются два макета, работающих в сантиметровом диапазоне волн, на которых отрабатываются технические решения по проведению аналоговой обработки сигналов. Достигнутый коэффициент шума в их приемных каналах составляет величину 3 дБ.

3. Радиотехническая система дистанционного зондирования подповерхностных сред. Система предназначена для обнаружения топливосодержащих масс под поверхностью укрывающих их слоев бетона, строительных конструкций и других материалов; определения координатной информации распределения масс в подповерхностной среде и установления степени опасных мест локализации радиационных материалов.

Система состоит из трех подсистем: пассивной, - реализующей радиотеплолокационный метод, основанный на приеме и обработке сигналов электромагнитных излучений материалов, имеющих тепловую контрастность; активной - реализующей радиоволновые методы локации сред, электрофизические свойства которых меняются под ионизирующим воздействием радиационных излучений; активной, реализующей модифицированный индуктивный метод электроразведки, позволяющий получить интегральное представление об электромагнитных свойствах сред по аномалиям их магнитных полей, возбуждаемых производимыми излучениями электромагнитных волн.

Принцип действия пассивной подсистемы наиболее просто поясняется на примере определения координат точечного объекта.

Полагается, что система простейшей комплектации состоит из двух каналов, обеспечивающих прием и корреляционную обработку сигналов, принимаемых двумя разнесенными в пространстве антеннами. Всплеск получаемого корреляционного рельефа (рис. 3, между точками F1 и F2) указывает на положение гиперболы, проходящей через точечный объект. Фокусы гиперболы (F1 и F2) совпадают с энергетическими центрами используемых антенн. В трехмерном подповерхностном пространстве указанному всплеску соответствует гиперboloид вращения, если подповерхностная среда однородна.



Пассивная подсистема, следовательно, обеспечивает измерение координат объектов в гиперболической системе координат.

Если антенны подсистемы перемещать дискретно по поверхности среды, вращая относительно некоторой точки, то фактически можно получить кольцевую решетку. Совместная обработка получаемых при этом наблюдений позволяет однозначно и более точно определить координаты объектов, если они точечные, и их границы, если они объемные.

Возможности данной подсистемы в значительной мере определяются отношением полосы обрабатываемых сигналов к полосе выходных фильтров накопления. Поэтому основные требования к подсистеме сводятся к обеспечению широкополостности приема и обработки сигналов и их длительному накоплению.

Глубина действия подсистемы зависит от диапазона используемых частот. Большая глубина достигается при использовании более низких частот, что приводит к увеличению размеров используемых антенн, и наоборот.

Полагается, что радиолокационная подсистема в простейшей комплектации состоит из передающего и приемного устройств, обеспечивающих прием и излучение сигналов с помощью двух антенн, разнесенных в пространстве (рис. 3). В приемном устройстве обеспечивается измерение рельефа отраженных сигналов. Всплеск этого рельефа (рис. 3, правее точки F2) указывает на положение эллипса, проходящего через объект. Фокусы этого эллипса (F1 и F2) совпадают с энергетическими центрами используемых антенн. В трехмерном подповерхностном пространстве указанному всплеску соответствует эллипсоид вращения эллипса вокруг оси F1F2, если среда однородна.

Радиолокационная подсистема, следовательно, обеспечивает измерение координат объектов в эллиптической системе координат. Как и в пассивном случае, вращение (или другое перемещение) антенн по поверхности среды позволяет однозначно и более точно определить координаты точечных и пространственно распределенных объектов. Возможности данной подсистемы также в основном определяются шириной спектра обрабатываемых сигналов.

Из изложенного видно, что при согласовании пассивной и радиолокационной подсистем в полосе обрабатываемых сигналов можно рационально объединить координатную информацию об объектах в ортогональных софокусных гиперболической и эллиптической системах координат. Кроме этого, в создаваемом образце в активной и пассивной подсистемах могут использоваться одни и те же антенны, общие высокочастотные блоки приемных устройств и единое устройство сопряжения и обмена с ПЭВМ.

128

Полагается, что подсистема индуктивной разведки состоит из генератора, излучающей антенны и двух приемников.

С помощью генератора и рамочной излучающей антенны в подповерхностной среде возбуждается электромагнитное гармонически меняющееся поле с дискретно меняющейся частотой. Антенна грубого приемного канала совмещена с излучающей антенной. Наводимые в ней первичные колебания устраняются с помощью компенсатора. В результате этого в приемнике грубого канала наблюдается реактивная составляющая сигнала, порожденная исследуемой средой. В приемнике точного канала, при перемещении его антенны по поверхности среды, измеряются параметры аномального изменения магнитного поля, порожденные подповерхностной средой.

В целом информационная основа активной и пассивной подсистем не является полностью эквивалентной. Активная подсистема оказывается более «чувствительной» к изменениям значений электрофизических параметров подземного пространства. Пассивная же подсистема лучше «чувствует» тепловой контраст сред, порождаемый проникающими в них излучениями, связанными с радиоактивным распадом веществ. Другими словами, объединение данных подсистем приводит к повышению возможностей общей системы.

Использованная подсистема индуктивного зондирования хотя и уступает по точности локализации неоднородностей активной подсистеме, однако позволяет проще и надежнее вести анализ более глубоких слоев. Это объясняется тем, что используемые в данной подсистеме сигналы имеют частоты более чем на порядок меньшие, чем в активной подсистеме.

Глубина действия подсистемы подповерхностного зондирования лежит в пределах 3-7 м, если используется метровый диапазон волн, близких к дециметровому, и - 5-15 м, если используется более низкочастотная часть метрового диапазона волн. При необходимости глубина действия системы может быть увеличена за счет использования скважин и соответствующей адаптации антенных систем.

Точность определения координат объектов (неоднородностей) лежит в пределах 5-10 % глубины действия.

В настоящее время созданы и успешно прошли испытания два макета, реализующие радиотеплолокационный и индуктивный методы разведки подповерхностных сред. Макеты предназначены для отработки использования данных методов в условиях специально создаваемого в Чернобыле компактного полигона [3].

Основные характеристики макета, реализующего радиотеплолокационный метод: диапазон используемых частот 150-600 МГц; шумовая температура входных УВЧ - менее 120 К; коэффициент усиления в приемных трактах регулируется в пределах 60-110 дБ; коэффициент корреляционного накопления - порядка 50 дБ.

Основные характеристики макета, реализующего индуктивный метод зондирования: мощность генерируемых сигналов - не менее 15 Вт; несущие частоты при переключении 1,75; 3,5; 7 МГц; пороговая чувствительность приемников выше 6 мВТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При разработке предлагаемых систем учтены имеющийся опыт создания подобных систем за рубежом, специфика исследуемых сред Чернобыльской зоны, а также использованы оригинальные разработки авторов, создавших макеты.

129

2. Состояние экспериментальных наработок таково, что имеется настоятельная необходимость проверки основных технических решений в условиях специально создаваемых компактных полигонов.

3. Целесообразно параллельно с созданием компактных полигонов приступить к разработке действующих образцов систем.

1. *Исследования* состояния опорных конструкций балок «Укрытия» Б1, Б2 в осях 47-51, Г-Л аварийного блока Чернобыльской АЭС // Отчет по НИР, выполненной НИИМБП по договору № 14. - Кн. 1: Численные исследования напряженно-деформированного состояния опорных конструкций. - Киев, 1993. - 382 с.

2. *Радиотехническая* система дистанционного определения пожароопасных участков и предупреждения о появлении газовых выбросов и альфа-зараженных территорий / В. А. Драпий, В. В. Гажиненко, И. И. Заруднев и др. - Деп. в УкрНИИТИ 25.11.92., №-Госрегистрации 0193U016762.

3. *Разработка* зонда, предназначенного для определения местоположения и плотности топливосодержащих масс в помещении объекта «Укрытие» // Отчет по НИР, выполненной НИИМБП по договору № 85/95. - Киев, 1996. - 51 с.

Получено 1.04.96

УДК 69 059.1-192

М. Н. Скуратовский, Н. Г. Ищенко, В. Л. Бродовой ДИНАМИКА ИЗНОСА И РЕМОНТОВ ЖИЛОГО ФОНДА г. ПРИПЯТЬ С УЧЕТОМ ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Исходя из предположения о возможном использовании жилого фонда г. Припять, рассматриваются задачи оценки и прогнозирования его износа и восстановления. Получены количественные зависимости между характеристиками износа и восстановления однотипных объектов. Подсчитан коэффициент готовности жилого фонда г. Припять при учете неоднородности его амортизации и различных скоростях старения.

Возможность использования г. Припять в будущем, например для проживания вахтового персонала, не исключается «Концепцией Чернобыльской зоны отчуждения на территории Украины» [1]. Поэтому в настоящее время становятся актуальными задачи оценки пригодности жилого фонда города и ее прогнозирования. Не менее актуальна и задача прогнозирования мощностей ремонтно-восстановительной базы, необходимой для поддержания эксплуатационной готовности жилого фонда на определенном уровне.

Полагается, что на стадии принятия концептуального решения о перспективах города необходимо теоретически обоснованно выявить тенденции в указанных оценках и прогнозах. Если решение об использовании жилого фонда будет принято, то и тогда, на стадии его проектной проработки, важность теоретического аспекта указанных задач, в особенности задач прогнозирования, очевидно не снизится.

Необходимое на этой стадии повышение достоверности численных оценок определится, в основном, повышением достоверности исходных данных за счет инженерного обследования зданий и сооружений города. При этом методики оценки и прогнозирования практически не зависят от достоверности исходных данных и могут, следовательно,

© М. Н. Скуратовский, Н. Г. Ищенко, В. Л. Бродовой, 1996

разрабатываться еще до их уточнения. Последующая корректировка разработанных методик не должна встретить принципиальных затруднений, поскольку будет иметь прикладную направленность, обусловленную главным образом дифференциацией объектов или ремонтно-восстановительной базы по конкретным типам или ресурсам.

В настоящей работе коллективом авторов НИИМБП предпринята попытка наметить пути создания указанных методик. Считаем целесообразным использовать для этого теоретические представления, принятые в области прогнозирования эксплуатационной надежности [2, 3]. Они состоят в определении объема износа и ремонта через характеристики основных типов инженерных конструкций и нормативные сроки эксплуатации. Именно такой подход к оценке состояния жилого фонда и мощности ремонтно-восстановительной базы принят в настоящей статье.

Методика получения количественных зависимостей между характеристиками износа и восстановления жилого фонда имеет много общего с одноименной проблемой, рассматриваемой в теории надежности (см., например, [4]). Необходимые нам характеристики отражаются в «коэффициенте готовности» - важном показателе надежной работы любой совокупности однородных объектов, внесенном в ГОСТ 20.237-74 «Расчет показателей безотказности восстанавливаемых объектов (без резервирования)» из известной системы стандартов по надежности.

В соответствии с традициями этой сформировавшейся системы изложим данный вопрос в формально-математических терминах. И лишь на этапе выполнения численных расчетов для жилого фонда г. Припяти перейдем на содержательные термины конкретного объекта.

Износ жилого фонда описывается обобщенной числовой характеристикой, которая показывает, какая доля его ежегодно выводится из эксплуатации и ставится на ремонт. Считается, что эта величина составляет λ % числа эксплуатируемых в данный момент зданий. Упоминание же о ежегодной доле является условным и исходит из желания поначалу использовать привычные в планировании величины. Действительно же речь идет о скорости износа, и поэтому точнее было бы говорить о количестве квадратных метров площади, уходящих в ремонт в единицу (сколь угодно малую) времени.

При этом пренебрегаем дискретным характером задачи ввиду достаточно больших размеров жилого фонда, так что λ % всего фонда может быть меньше одного дома (только его малой частью). Впрочем, это неудивительно, поскольку речь идет о скорости, т. е. об изменении количества в малый отрезок времени.

Истинная величина физического износа и его структура здесь не упоминаются, поскольку износ представляет интерес, только исходя из определения размеров годной части жилого фонда и требований к мощности ремонтной базы. Описанная таким образом Скорость износа может учитывать и предшествующий опыт, и директивные решения. Величина λ оказывается связанной со средним сроком службы здания, который отражает те же факторы. В приводимых ниже примерах мы будем вычислять λ , задавая средний срок службы.

Следует уточнить смысл принятой характеристики износа λ . Интенсивность отказов, равная λ , является переменной во времени величиной, зависящей от многих факторов. Ввиду сложности этой зависимости и ее малой изученности можно было бы попытаться уточнить зависимость $\lambda(t)$, приняв ее хотя бы ступенчатой. Однако для прозрачности применяемых методов, и с учетом краткосрочности прогноза, λ принимается постоянным.

Мощность ремонтной базы характеризуется аналогично. А именно, считаем, что в единицу времени в эксплуатацию возвращается μ % зданий, находящихся на ремонте в данный момент. Скорость μ также считается постоянной. Она входит в окончательную формулу для коэффициента готовности. Для получения его удовлетворительных значений приходится развивать соответствующие мощности, которые и определяют значения μ .

Используем следующие обозначения: $R(t)$ - доля жилого фонда, находящегося в эксплуатации; $Q(t)$ - доля жилого фонда, находящегося в ремонте. Считается, что других состояний у жилого фонда нет, так что

$$R(t) + Q(t) = 1. \quad (1)$$

Другими словами, в теории надежности $R(t)$ - нестационарный коэффициент готовности, а $R = \lim_{t \rightarrow \infty} R(t)$ - стационарный.

Здесь решаемая проблема состоит в нахождении коэффициента готовности и делится на ряд самостоятельных, более простых задач. Результаты их решения используются для решения более сложной задачи, учитывающей большее число реальных факторов.

Задача 1. При постоянной скорости износа зданий λ и отсутствии ремонтов определить коэффициент готовности жилого фонда в произвольный момент t .

Решение задачи 1. Пусть общее число домов в фонде равно D_0 , а в момент t число исправных домов равно $D(t)$. Тогда в момент $t + dt$ число исправных домов таково:

$$D(t + \Delta t) = D(t) - \lambda D(t) \cdot \Delta t. \quad (2)$$

Переходя в соотношении $\frac{D(t + \Delta t) - D(t)}{\Delta t} = -\lambda D(t)$ к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, получаем дифференциальное уравнение:

$$D' + \lambda D = 0. \quad (3)$$

Его решение, удовлетворяющее условию

$$D(t = 0) = D_0, \quad (4)$$

имеет вид

$$D(t) = D_0 e^{-\lambda t}. \quad (5)$$

Таким образом, коэффициент готовности

$$R(t) = \frac{D(t)}{D_0} = e^{-\lambda t}. \quad (6)$$

Доля домов, подлежащих ремонту, такова:

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (7)$$

Представим результат (6) через средний срок службы зданий T_0 .

Определим T_0 так:

$$T_0 = \frac{\int_0^\infty t dD(t)}{D_0}. \quad (8)$$

132

Подставляя в (8) выражение (5) и интегрируя по частям, получаем

$$T_0 = 1/\lambda$$

Тогда в наших обозначениях коэффициент готовности

$$R(t) = e^{-\frac{t}{T_0}}. \quad (10)$$

Вывод зависимостей (9) и (10) известен и здесь приводится лишь для связности изложения вопроса.

Задача 2. Эта задача отличается тем, что к моменту $t=0$ жилой фонд уже эксплуатировался τ лет, но не ремонтировался. Требуется определить коэффициент готовности в момент t .

Решение задачи 2. Очевидно, что решение задачи задается формулой

$$R(t) = e^{-\lambda(\tau+t)}. \quad (11)$$

Задача 3. Эта задача отличается более существенным дополнением. К моменту $t=0$ жилой фонд уже эксплуатировался τ_0 лет, но разные дома были построены в разное время. Число $N(\tau)$ определяет скорость изменения фонда в долях от D_0 в момент $\tau < 0$. Требуется определить коэффициент готовности фонда в произвольный момент времени $t > 0$ при отсутствии ремонтов.

Решение задачи 3. Очевидно, что

$$\int_{-\infty}^0 N(\tau) d\tau = 1.$$

У той части фонда, где $\tau_1 < \tau < \tau_2$ и $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ весьма мало, можно считать величиной постоянной и определять для нее коэффициент готовности по формуле (11). Обозначим его через $R(t, \tau)$, сохраняя обозначение $R(t)$ для фонда в целом.

Число домов с наработкой τ к моменту $t=0$ будет таково: $D(\tau) = D_0 N(\tau) \Delta\tau$, из них пригодных для эксплуатации в момент $t - D_0 N(\tau) R(t, \tau) \Delta\tau$. Всего по фонду их число равно

$$\int_{-\infty}^0 D_0 \cdot N(\tau) \cdot R(t, \tau) d\tau.$$

Следовательно, коэффициент готовности фонда в целом определится формулой

$$R(t) = \int_{-\infty}^0 N(\tau) \cdot R(t, \tau) d\tau, \quad (12)$$

или

$$R(t) = e^{-\lambda t} \int_{-\infty}^0 N(\tau) \cdot e^{-\mu \tau} d\tau. \quad (12a)$$

Здесь предполагалось, что $N(\tau)$ - непрерывная функция. Далее мы будем рассматривать случай, когда численность фонда меняется скачкообразно во времени. Это приводит к тому, что $N(\tau)$ уже описывается δ -функциями.

Подставляя в (12a) конкретные функции $N(\tau)$, получаем решение задачи.

133

Замечание. Возможно обобщение этой задачи в том отношении, что учитываются разные режимы эксплуатации разных частей фонда до момента $t=0$. Этот фактор может быть учтен изменением реальной функции $N(\tau)$ путем увеличения τ для той части фонда, которая эксплуатировалась в более жестких условиях.

Задача 4. В условиях, сформулированных во введении, ставится вопрос о нахождении функции $R(t)$, если жилой фонд постоянно ремонтируется, а по прошествии T лет после последнего ремонта каждое здание отправляется в планово-предупредительный ремонт.

Кроме того, допускаем, что весь жилой фонд вводился в эксплуатацию одновременно, т. е. в момент $t=0$ он весь был в исправном и неизношенном состоянии.

Решение задачи 4. Разобьем весь временной интервал $(0, \infty)$ на две части: $(0, T)$ и (T, ∞) . Для первого интервала имеем уравнение баланса

$$dR = -\lambda R(t) dt + \mu Q(t) dt, \quad (13)$$

а для второго интервала

$$dR = -\lambda R(t) dt + \mu Q(t) dt - e^{-\lambda T} \mu Q(T - T) dt. \quad (14)$$

Последнее слагаемое учитывает уход в профилактический ремонт по достижении срока службы в T лет тех домов, которые вышли из ремонта в момент $t - T$.

Кроме уравнений (1) и (13), имеем еще и начальное условие

$$R(0) = 1. \quad (15)$$

Приведенные уравнения вполне характеризуют поставленную задачу и остается только найти решение математической проблемы. Система уравнений (1), (13) и (15) имеет решение

$$R(t) = \frac{\mu + \lambda e^{-(\lambda + \mu)t}}{\lambda + \mu}. \quad (16)$$

Оно приводится в литературе (см., например, [4, стр. 119]).

Для второго временного интервала имеем дифференциальное уравнение с запаздывающим аргументом (см., например, [5]), вытекающее из (14) и (1).

Возникает лишь особенность при определении начального условия для этого шага. $R(t)$ терпит разрыв при $t=T$ из-за массового ухода домов в ремонт по достижении наработки T . Поэтому следует принять

$$R(T-0) - R(T+0) = e^{-\lambda T}. \quad (17)$$

В соответствии с (16) имеем

$$R(T+0) = \frac{\mu + \lambda e^{-(\lambda+\mu)T}}{\lambda + \mu} - e^{-\lambda T}, \quad (18)$$

и при $T < t < 2T$ решение системы уравнений (1), (14) и (18) имеет вид

$$R(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda \mu e^{-\lambda T}}{(\lambda + \mu)^2} - e^{-(\lambda+\mu)t+\mu T} \left[1 - \frac{\lambda \mu}{(\lambda + \mu)^2} - \frac{\lambda \mu (t - T)}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda e^{-\mu T}}{\lambda + \mu} \right]. \quad (19)$$

Для остальных шагов по времени ($2T < t \leq 3T$ и т. д.) начальные условия получаются из соображений непрерывности функции $R(t)$, а остальные действия вполне аналогичны предыдущему, но приводят к еще более громоздким формулам. Поэтому здесь целесообразно уже использовать численные значения коэффициентов.

134

Система (1), (14) имеет стационарное решение

$$R = 1 - \frac{\lambda}{\lambda + \mu(1 - e^{-\lambda T})}, \quad (20)$$

к которому стремится функция $R(t)$ при $t \rightarrow \infty$. Другой способ получения стационарного коэффициента готовности (20) указан В. С. Королюком на основании техники полумарковских процессов (см., например, [6]). Здесь же получен нестационарный коэффициент готовности при $t < 2T$ и указан путь его вычисления при $t > 2T$ на основе более простой техники.

Это позволяет определять требуемую мощность ремонтной базы или изменять сроки планово-предупредительных ремонтов для обеспечения достаточной степени готовности жилого фонда.

Задача 5. Данная задача отличается от предыдущей только одним дополнением: к моменту $t=0$ жилой фонд уже имел наработку в τ лет, но не ремонтировался. Ввиду того, что жилой фонд г. Припять довольно молодой, ограничимся случаем $\tau < T$.

Решение задачи 5. В соответствии с зависимостью (6) теперь условие (15) выглядит так:

$$R(0) = e^{-\lambda \tau} \quad (21)$$

Выделим временные интервалы: $(0, T - \tau)$, $(T - \tau, T)$, (T, ∞) и т. д., и сначала решим задачу о нахождении $R(t)$ в первом временном интервале. Для этого случая уравнения (11) и (13) остаются без изменения, и решение при условии (21) имеет вид

$$R(t) = \left(e^{-\lambda \tau} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \right) e^{-(\lambda+\mu)t} + \frac{\mu}{\lambda + \mu}. \quad (22)$$

Для получения решения во втором временном интервале следует произвести некоторые изменения в предыдущих формулах.

Уравнение (17) заменяется следующим:

$$R(T - \tau - 0) - R(T - \tau + 0) = e^{-\lambda \tau}. \quad (23)$$

В соответствии с формулой (22) имеем

$$R(T - \tau + 0) = \left(e^{-\lambda \tau} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \right) e^{-(\lambda+\mu)(T-\tau)} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} - e^{-\lambda T}. \quad (24)$$

Уравнение баланса жилого фонда (13) здесь не претерпевает изменения, но на интервале $(T - \tau, T)$ оно должно решаться уже с начальным условием (24). Это решение имеет вид

$$R(t) = \left[e^{-\lambda \tau} - e^{\lambda T + (\lambda+\mu)(T-\tau)} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \right] e^{-(\lambda+\mu)t} + \frac{\mu}{\lambda + \mu}. \quad (25)$$

Для третьего временного интервала уравнение баланса меняется, а в его начале при $t=T$ функция $R(t)$ уже не претерпевает скачка. Решение может быть получено тем же способом, но его аналитическое выражение оказывается слишком громоздким, и здесь его не приводим. Расчеты должны вестись уже при численных значениях параметров.

Задача 6. Данная задача отличается от предыдущей тем, что к моменту $t=0$ жилой фонд уже эксплуатировался, но разные дома были

135

построены в разное время. Как и в задаче 3, это обстоятельство характеризуется функцией $N(\tau)$.

По-прежнему считаем, что

$$\tau < T, \quad (26)$$

и до момента $t=0$ жилой фонд не ремонтировался. Как и раньше, требуется определить коэффициент готовности, хотя бы при малых временах t .

Решение задачи 6. Рассуждения можно вести, как и при решении задачи 3. Следовательно, коэффициент готовности фонда в целом определится формулой

$$R(t) = \int_{-\infty}^0 N(\tau) R(t, \tau) d\tau, \quad (27)$$

где $R(t, \tau)$ берется соответственно по (22) и (25).

Замечания. Учет различий в режиме эксплуатации до момента $t=0$ может быть сделан аналогично тому, как это указано в замечаниях к решению задачи 3.

Сделаем еще два замечания. До сих пор мы считали, что до момента $t=0$ жилой фонд не ремонтировался. Сейчас мы можем отказаться от этого ограничения, учитывая это обстоятельство изменением функции $N(\tau)$. В ней время τ может быть отсчитано от более поздних моментов времени и в зависимости от степени капитальности ремонта.

Второе замечание относится к срокам планирования, которые фигурируют в решении задач 1-6. В соответствии с практическими потребностями, возникающими сейчас при изучении перспективы использования жилого фонда г. Припять, нет необходимости планировать на очень большой срок вперед. Поэтому решения задач содержат времена порядка T , и они достаточны, так как составляют 10-15 лет.

Планирование будет более точным, если его продолжить через некоторое время с учетом возникающих конкретных обстоятельств.

Перейдем к решению задач, относящихся непосредственно к жилому фонду г. Припять.

Согласно имеющейся в НИИМБП информации в г. Припять на 1.01.1986 г. жилой фонд составлял:

265 492 м², относящихся к 1-й очереди строительства (ориентировочно введенных в эксплуатацию 1.01.1972 г.);

112 935 м², относящихся ко 2-й очереди строительства (1.01.1978 г.);

168 335 м², относящихся к 3-й очереди строительства (1.01.1982 г.);

так что общая площадь жилого фонда $265\,492 + 112\,935 + 168\,335 = 546\,762$ м².

Кроме этого, здания соцкультбыта составляли 30-40 % площади жилого фонда. Будем считать, что этот процент в равной мере относится к каждой из очередей строительства. Поэтому он не влияет на коэффициенты готовности, и мы его не учитываем.

Задача 1П. Определить коэффициент готовности жилого фонда г. Припять на 26.04.1986 г., с учетом того, что с момента введения его в эксплуатацию он не ремонтировался.

Решение задачи 1П. Из имеющихся данных находим, что площадь, относящаяся к 1-й очереди строительства, составляет

$$\frac{265\,492}{546\,762} \times 100 \% \approx 48,5 \% \text{ фонда,}$$

136

$$\text{ко 2-й очереди - } \frac{112\,935}{546\,762} \times 100 \% \approx 20,7 \% \text{ фонда,}$$

$$\text{к 3-й очереди - } \frac{168\,335}{546\,762} \times 100 \% \approx 30,8 \% \text{ фонда.}$$

Другими словами, функция $N(\tau)$ представляет собой линейную комбинацию δ -функций, сосредоточенную в точках τ_1 , τ_2 и τ_3 , с коэффициентами $k_1=0,485$, $k_2=0,207$ и $k_3=0,308$. Начало отсчета времени выберем с 1.01.1982 г. Тогда $\tau_1=1.01.1982-1.01.1972 = 10$ лет, $\tau_2=1.01.1982-1.01.1978 = 4$ года, $\tau_3 = 0$ лет.

Подсчет $R(t)$ ведем для $t=26.04.1986-1.01.1982=4,3$ года. В соответствии с типом основных конструктивных элементов, отнесем здания жилого фонда г. Припять к 1-й группе

зданий по капитальности. Тогда по нормам Госжилкомхоза Украины (см. [7, дополнение 2]) срок службы зданий составляет $T_0 = 150$ лет. Согласно формуле (9) имеем

$$\lambda = \frac{1}{150} \text{ г.}^{-1}$$

Подставляя в формулу (12а) функцию $N(\tau) = [0,4858(-10) + 0,2078(-4) + 0,3088(0)] \text{ г.}^{-1}$, получаем

$$\int_{-\infty}^0 N(\tau) e^{-\lambda \tau} d\tau = 0,9633.$$

Далее

$$R(4,3 \text{ г.}) = e^{-\frac{4,3}{150}} \times 0,9633 \approx 0,936 = 93,6 \%,$$

что и является коэффициентом готовности жилого фонда г. Припять на 26.04.1986 г.

Задача 2П. Определить коэффициент готовности жилого фонда г. Припять на 1.01.1997 г. с учетом нарушений нормального режима эксплуатации, имевших место после аварии, произошедшей 26.04.1986 г.

Решение задачи 2П. Нарушение режима эксплуатации, например, температурно-влажностного, имевшее место после аварии 1986 г., мы оцениваем, как ускорение старения жилого фонда, увеличением его возраста вдвое по сравнению с соответствующими календарными сроками за этот период. Таким образом, старение составит $(1.01.1997 - 26.04.1986) \times 2 \approx 10,7 \text{ г.} \times 2 = 21,4 \text{ г.}$ Решение задачи по-прежнему задается формулой (12а). Момент времени $t = 0$ по-прежнему относится к 1.01.1982, так что $t = 4,3 \text{ г.} + 21,4 \text{ г.} = 25,7 \text{ г.}$

$$\int_{-\infty}^0 N(\tau) e^{-\lambda \tau} d\tau = 0,9633.$$

Ранее

мы

имели

Теперь

получаем

$R(25,7 \text{ г.}) = e^{-\frac{25,7}{150}} \times 0,9633 = 0,8127 \approx 81,3 \%$. Согласно этому подсчету 1.01.1997 г. в ремонт должно быть выведено $0(1.01.1997) = 100 \% - 81,3 \% = 18,7 \%$ жилого фонда. Поскольку данный анализ не учитывает характера повреждений, полученных в разных домах, часть жилого фонда, предназначенного к ремонту, может все же использоваться

137

при снижении требований к его комфортности. Так что полученный результат следует трактовать только как некоторую среднюю характеристику деградации жилого фонда, пригодную в основном для технико-экономических расчетов. Для сравнения подсчитаем коэффициент готовности на 1.01.1997 г. без учета ускоренного старения в период после 26.04.1986 г. (здесь $t = 4,3 \text{ г.} + 10,7 \text{ г.} = 15 \text{ лет}$):

$$R(15 \text{ лет}) = e^{-\frac{15}{150}} \times 0,9633 = 0,8716 \approx 87,2 \%.$$

Сравнивая полученный результат с предыдущим результатом $R(25,5 \text{ г.})$, можем отметить существенное ускорение старения жилого фонда за счет нарушения режима его эксплуатации после 26.04.1986 г. За период с 26.04.1986 г. по 1.01.1997 г. при старении с учетом нарушения режима эксплуатации в ремонт должно быть выведено $93,6 \% - 81,3 \% = 12,3 \%$ фонда, а при обычном старении всего $93,6 \% - 87,2 \% = 6,4 \%$ фонда.

Полученный результат является следствием принятой экспертной оценки старения. Как показывают данные Ленинградского бюро технической инвентаризации, в условиях обезлюдения города в период блокады г. Ленинграда во время Великой Отечественной войны процесс старения домов, построенных после 1940 г., шел гораздо быстрее. Однако полной идентичности в ситуации здесь нет, и мы ограничимся полученной оценкой.

Задача 3П. В терминах развитой теории (коэффициент μ) определить мощность ремонтной базы жилого фонда г. Припять, необходимой для достижения в ближайшие годы того уровня готовности, который имел его фонд на 26.04.1986 г. Минимальная наработка T , при которой дом уходит в планово-предупредительный ремонт, составляет 40 лет.

Решение задачи 3П. Считаем, что ремонтная база начнет функционировать с 1.01.1997 г. Поэтому $t=0$ отнесем к этому моменту. Для решения задачи используем формулы

(22), (23) и (25). Входящие в них наработки t должны быть пересчитаны с учетом изменения начала отсчета t .

$$\tau_1 = (26.04.1986 - 1.01.1972) + 21,4 = 35,7 \text{ г.},$$

$$\tau_2 = (26.04.1986 - 1.01.1978) + 21,4 = 29,7 \text{ г.},$$

$$\tau_3 = (26.04.1986 - 1.01.1982) + 21,4 = 25,7 \text{ г.}$$

Функция $N(\tau)$, фигурировавшая в задаче 1П, теперь выглядит так:

$$N(\tau) = [0,4856(-35,7) + 0,2075(-29,7) + 0,3088(-25,7)] \text{ г.}^{-1}.$$

Коэффициент готовности 1986 г., который требуется достичь, вычислен в задаче 1П. Он составляет 93,6 %. Выполним несколько вариантов расчета, пытаясь достичь его последовательно в 2000 г., 2003 г., 2005 г., 2010 г. Естественно, что μ при этом будет принимать различные значения. Решение уравнений (27)

для отыскания μ будем вести путем непосредственного табулирования правой части (28) с шагом 1 % на ЭВМ.

138

Для выбора между использованием формулы (22) или (23) нам следует явно указать интервалы $(0, T-\tau)$ и $(T-\tau, T)$ каждой

очереди строительства

$$0,936 = \int_{-\infty}^0 N(\tau) R(t, \tau) d\tau$$

(28), фонда:

$$T-\tau_1 = 40 - 35,7 = 4,3$$

г.,

$$T-\tau_2 = 40 - 29,5 = 11,3$$

г.,

$$T-\tau_3 = 40 - 25,7 = 14,3 \text{ г.}$$

Ниже, в табл. 1, укажем требуемый номер формулы для всех t , соответствующих 2000 г., 2003 г. и т. д. для каждой очереди строительства. Выбор номера формулы осуществляется путем сопоставления соответствующего t и положения временных интервалов $(0, T-\tau)$ и $(T-\tau, T)$ на числовой оси.

Промежуточные вычисления опущены, а результаты приведены в предпоследней строке табл. 1. В последней строке той же таблицы приведены для сравнения результаты аналогичного расчета при менее обременительном требовании обеспечить к указанным срокам коэффициент готовности 87,2 %, которого достиг бы жилой фонд к 1.01.1997 г. без планово-предупредительных ремонтов при отсутствии аварии 1986 г.

Проследим динамику изменения μ и сделаем некоторые пояснения. Как и следовало ожидать, получили, что $\mu_{86}(t) > \mu_{97}(t)$. Это объясняется тем, что $R(1986) > R(1997)$. При беглом подходе может показаться странным, что $\mu_{86}(2003) = 109 \% \text{ г.}^{-1} > 100 \% \text{ г.}^{-1}$. Может ли количество отремонтированных за год домов превышать среднее в году число домов, одновременно находящихся в ремонте? Ответ на этот вопрос положительный, и он имеет два объяснения.

1-е объяснение. Пусть в течение года в ремонте находилось 10 домов. При этом ежемесячно один дом выходил из ремонта, но приходил в ремонт один новый. В течение года отремонтировано 12 домов. Это соответствует $\mu = 120 \% \text{ г.}^{-1}$.

2-е объяснение состоит в том, что величина μ -размерная. Если перейти от размерности $(\text{год})^{-1}$ к размерности $(\text{мес.})^{-1}$, то $109 \% \text{ г.}^{-1} = 9,8 \% \text{ мес.}^{-1}$. Эта величина уже не вызывает недоумения при беглом просмотре результатов.

Продолжим анализ результатов из табл. 1. Рост величины $\mu(2003 \text{ г.})$ по сравнению с $\mu(2000 \text{ г.})$ объясняется тем, что в 2001 г. для неремонтированных домов из 1-й очереди строительства наработка достигает 40 лет и они массово уходят в планово-предупредительный ремонт. Поэтому поддержание требуемого уровня готовности в 2003 г. требует введения заранее ремонтной базы повышенной мощности.

Таблица 1. Показатели мощности ремонтной базы

Очередь	1.01.2000 г.	1.01.2003 г.	1.01.2005 г.	1.01.2007 г.	1.01.2010 г.
	t = 3 г.	t = 6 лет	t = 8 лет	t = 10 лет	t = 13 лет
1-я	22	23	23	23	23
2-я	22	22	22	22	23
3-я	22	22	22	22	22
$\mu_{86}, \% \text{ г.}^{-1}$	41	109	54	37	47
$\mu_{97}, \% \text{ г.}^{-1}$	16	68	35	25	28

139

Этим же объясняется, что $\mu(2010) > \mu(2007)$, но уже для домов из 2-й очереди строительства. Они уходят в массовый планово-предупредительный ремонт в 2008 г.

В целом рост μ по годам объясняется тем, что поддержание при одинаковом уровне готовности все более стареющего фонда требует более развитой ремонтной базы.

При определении мощности ремонтной базы в абсолютных цифрах необходимо по найденным значениям μ определять ее производительность в натуральных показателях. Приведем пример численных расчетов.

Пусть соцкультбыт составляет 35 % жилого фонда. Тогда общий фонд составляет

$D_0 = 546\,762 \times 1,35 = 738\,129 \text{ м}^2$. На 1.01.1997 г. к использованию будет готово

$D(1997 \text{ г.}) = 738\,129 \times 0,813 = 600\,099 \text{ м}^2$ площади. Одновременно в ремонте будет находиться $738\,129 \times (1 - 0,813) = 138\,030 \text{ м}^2$ площади. При достижении к 1.01.2000 г. коэффициента готовности $R = 93,6\%$ город располагал бы к этому моменту

$738\,129 \times 0,936 = 690\,889 \text{ м}^2$ вполне пригодной к использованию площади.

При выбранной динамике развития ремонтной базы скорость ремонта определяется числом $\mu_{86}(2000 \text{ г.})$ из табл. 1:

$\mu_{86}(2000) = 0,41 \text{ г.}^{-1} = 0,0342 \text{ мес.}^{-1}$.

Таким образом, для обеспечения принятого плана достичь к 1.01.2000 г. пригодного фонда в размере $690\,889 \text{ м}^2$ уже в январе 1997 г. производительность ремонтной базы должна составить

$138\,030 \times 0,0342 = 4716 \text{ м}^2$ площади.

Замечание. Выбранная динамика развития ремонтной базы характеризуется зависимостью $\mu(t) = \text{const}$. Это приводит к переменной во времени производительности ремонтной базы, равной величине $\mu Q(t)$ в единицу времени. Это может оказаться нежелательным, и тогда может быть выбран другой динамический подход. Например, может быть взято $\mu(t)Q(t) = \text{const}$. Этот вариант требует отдельного рассмотрения и может быть изучен в рамках аналогичного подхода.

1. *Концепція Чорнобильської зони відчуження на території України. Затверджувана частина.* - Мінчорнобиль України, К.: 1995. - 24 с.
2. *Рогонский В. А., Костриц А. И., Шеряков В. Ф.* Эксплуатационная надежность зданий. - Л.: Стройиздат, 1983. - 280 с.
3. *Нечаев Н. В.* Капитальный ремонт жилых зданий. - М.: Стройиздат, 1990. - 207 с.
4. *Барлоу Р., Прошан Ф.* Математическая теория надежности. - М.: Советское Радио, 1969. - 488 с.
5. *Эльсгольц Л. Э., Норкин С. Б.* Введение в теорию дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом. - М.: Наука, 1971. - 296 с.
6. *Королюк В. С., Турбин А. Ф.* Полумарковские процессы и их приложения. - К.: Наукова думка, 1976. - 255 с.
7. *Наказ Держжитлокомунгоспу України від 31.12.1991 р. № 135.*

Получено 1.04.96

140

В. Я. Пинчук, С. А. Довгий, В. М. Калинин, О. В. Копейка
ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА «ИНФОРМ-ЧЕРНОБЫЛЬ»

Дано концептуальное описание создаваемой ведомственной системы управления, предназначенной для поддержки принятия решений на базе автоматизации информационных процессов в области всего комплекса проблем по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС и защиты населения от их влияния. Приведены основные проектные решения по созданию системы. Представлен новый подход к проектированию больших информационных систем.

1. Организационно-техническая система (ОТС) «Информ-Чернобыль»

создается как ведомственная система управления, обеспечивающая поддержку процессов принятия решений на базе автоматизации информационных процессов в области всего комплекса проблем по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС и защиты населения от их влияния.

Главным заданием системы есть автоматизированная поддержка функций Министерства, которые определены в положении о Министерстве, обработка информации, поступающей из региональных и отраслевых структур по соответствующим территориям, населенным пунктам и группам населения, обобщение результатов обработки данных аналитических исследований, которые содержатся в десятках баз данных различных предприятий и организаций.

Принципиальной особенностью системы «Информ-Чернобыль» есть ее техническая сложность, так как объединение в ней задач различной направленности отраслевого и регионального уровней, объемы информации и масштабы затрагиваемых вопросов позволяют рассматривать ее как пилот-проект системы управления народным хозяйством Украины.

2. Основные проектные решения по созданию ОТС.

2.1. Содержание целей и задач создания ОТС более полно раскрыто в соответствующих документах по созданию ОТС. Здесь отметим лишь основные положения, которые предусматривают следующее:

— внедрение информационных, программно-технических и технологических решений относительно сбора и обработки информации по проблемам преодоления последствий Чернобыльской катастрофы (общепринятое сокращение ЛПА на ЧАЭС) с целью оперативного управления ситуацией, учета отдаленных последствий аварии, получения новых знаний о проблеме, прогнозирования развития ситуации;

— автоматизацию управленческой и офисной деятельности сотрудников Минчернобыля;

— обеспечение формирования оптимальных стратегий, направленных на ЛПА на ЧАЭС;

— повышение эффективности и качества мероприятий по ЛПА на ЧАЭС, контроля за использованием материальных и финансовых ресурсов.

При разработке концепции создания ОТС, которая явилась следствием изучения объекта автоматизации - Минчернобыля - определены функции и основные характеристики объекта, сформулированы требования к ОТС по всем направлениям и видам обеспечения. Проведенные работы нашли свое отражение в документах по созданию ОТС и ее отдельных элементов.

© В. Я. Пинчук, С. А. Довгий, В. М. Калинин, О. В. Копейка, 1998

2.1.1. Структура ОТС. ОТС представляет собой трехуровневую иерархическую систему. Нижний уровень образуют узлы регионального уровня, осуществляющие сбор первичной информации и ее накопление. Второй уровень включает в себя сеть научных и специализированных организаций, которые интегрируют и обрабатывают данные, моделируют процессы, связанные с оценкой и прогнозированием нынешнего состояния и перспективы развития различных ситуаций. Этот уровень называется предметно-аналитический, исходя из специфики решаемых на этом уровне задач, носящих ярко выраженный предметный характер. Центральный, или верхний, уровень иерархии ОТС образует административный аппарат Минчернобыля. Предлагаемая структура была принята за основу построения ОТС и утверждена коллегией министерства.

Типы циркулирующей информации, наполнение уровней и их взаимосвязь, а также связи ОТС с внешними системами приведены на рис. 1.

2.1.2. Состав и назначение подсистем. Исходя из задач и функций Министерства, его организационной структуры, предметной направленности управлений были выделены структурные единицы ОТС - подсистемы различных уровней. При этом под подсистемой понимается обладающая целостностью и объединенная определенными связями совокупность программных и технических элементов.

На рис. 2 приведена структура и перечень создаваемых подсистем. Такая структура в полной мере отражает организационную основу министерства, предметную направленность исследований, административный состав территорий, подвергшихся загрязнению, и исторически сложившееся положение, при котором различные подсистемы разрабатывались различными организациями на основании собственных проектных решений.

Особое место в рассматриваемой структуре занимает подсистема поддержки принятия решений высшим уровнем руководства Министерства (СППР), которая находится в стадии проектирования.

2.1.3. Уровни интеграции элементов ОТС. Каждый уровень ОТС имеет свою структурную организацию, которая складывается из информационных узлов-подсистем. В соответствии с концепцией построения ОТС подсистема образуется из набора автоматизированных рабочих мест (АРМов), которые существенно изменяют функции деятельности конкретного должностного лица, обеспечивая тем самым более полную реализацию отдельных функций подсистемы. В рамках подсистемы АРМы взаимодействуют друг с другом через локальную вычислительную сеть. Информационный базис подсистем реализуется в виде центрального интегрированного банка данных. Связь с другими элементами (подсистемами и АРМами) происходит с помощью общей коммуникационной шины - элемента глобальной сети.

2.2. Построение основных элементов центрального уровня. Как отмечено выше, центральный уровень ОТС образуют подсистемы управлений министерства, интегрирующим звеном которых выступает система поддержки принятия решений (СППР) высшим уровнем руководства министерства.

Подсистемы функционируют на едином информационном поле, основу которого составляет интегрированный банк данных. Вся информация в ОТС циркулирует в рамках глобальной вычислительной сети, а основой транспортного механизма, как внутри центрального ядра системы, расположенного на трех удаленных друг от друга

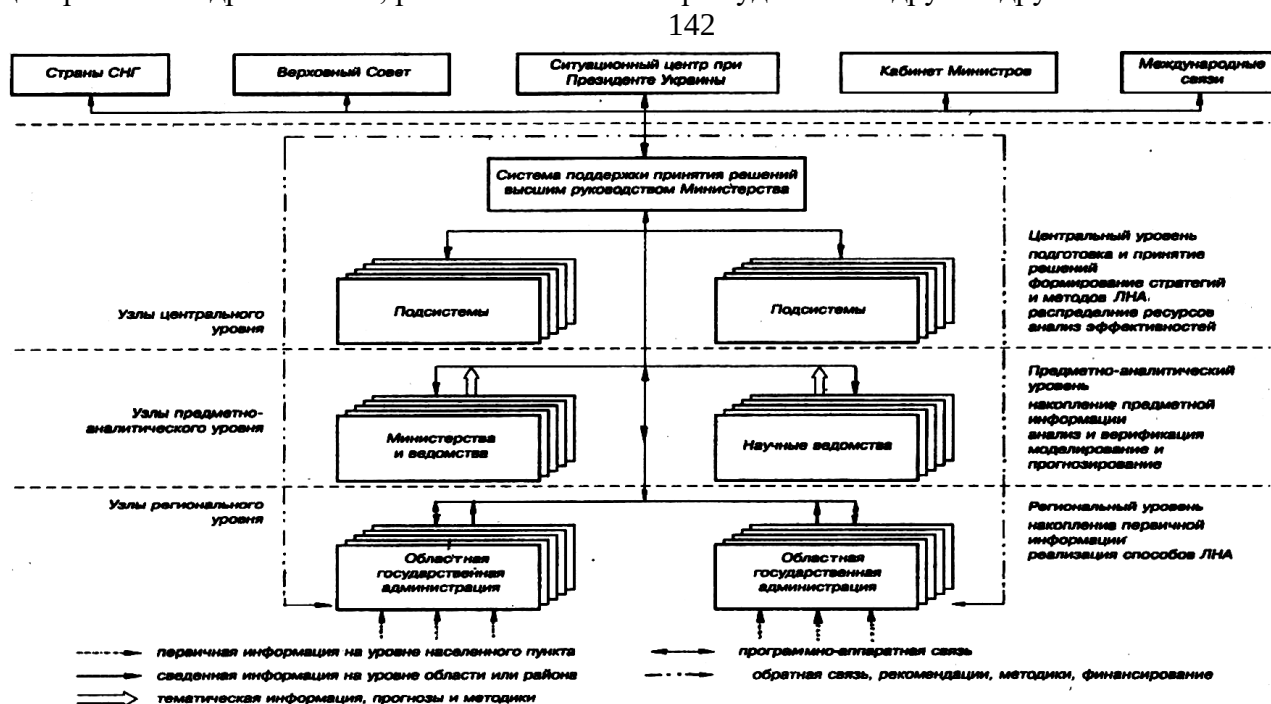


Рис. 1. Структура ОТС «Информ-Чернобыль».

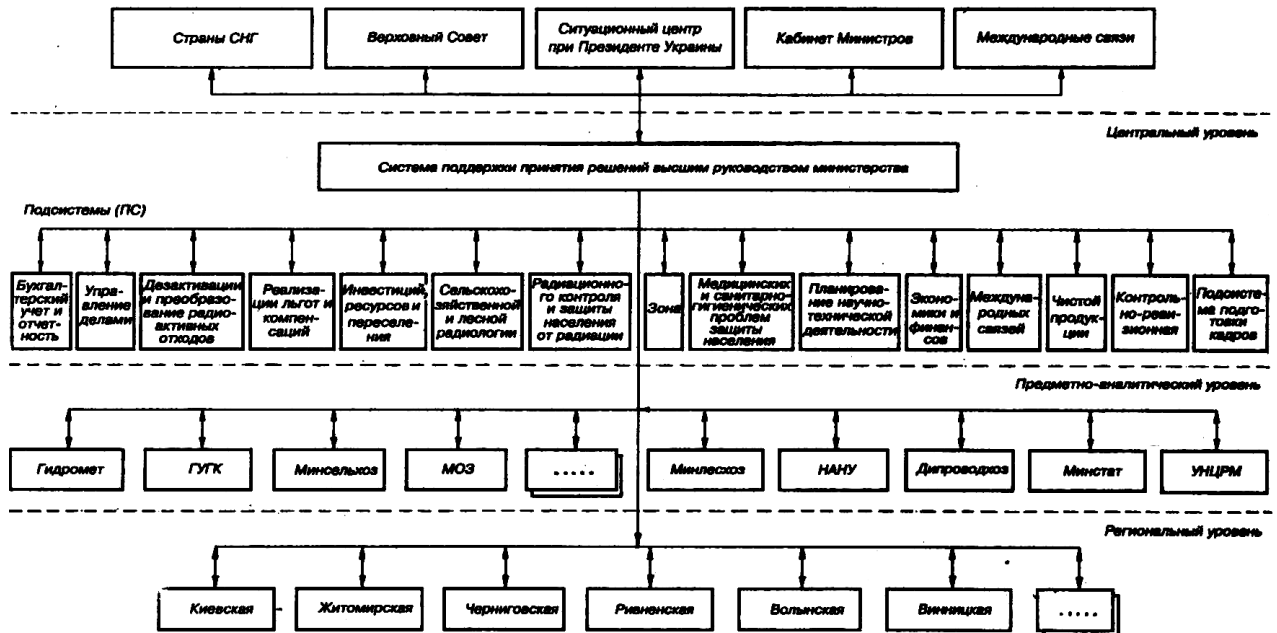


Рис. 2. Структура подсистем ОТС «Информ - Чернобыль».

144

площадках, так и с его периферией и внешней средой, являются средства электронной почты. Именно эти элементы составляют основу разрабатываемой системы.

2.2.1. Основными задачами СППР являются:

- обеспечение условий для подготовки и принятия обоснованных и эффективных управленческих решений, систематического контроля их выполнения, оперативного реагирования на тревожные и критические ситуации;
- обеспечение доступа ко всей информации, циркулирующей в ОТС, путем выборки информации общего (системного) характера и прямого вхождения в отдельные подсистемы и АРМ для непосредственной работы с более детальной информацией;
- совместное отображение и обработка информации на основе использования методов пространственного, аналитического и экспертного анализа;
- оперативное информирование лица, принимающего решения о состоянии дел на текущий момент;
- выдача рекомендаций по штатным действиям в той или иной ситуации;
- контроль и регистрация действий лица, принимающего решения.

Как видно из приведенного перечня основных функций, СППР - это сложная система, выполняющая роль связывающего звена и контролирующего органа.

2.2.2. Интегрированный банк данных. Интегрированный банк данных (ИБД) - вторая составная часть центрального уровня. Он образует информационный базис системы, объединяя в себе совокупность разнородных данных.

Разнородность и громадный объем данных, которые будут находиться в проектируемом банке, накладывают определенные жесткие требования как на логическую структуру банка данных, так и на его программное исполнение. Поэтому проектные решения по техническому и программному обеспечению ОТС учитывают использование мощного сервера и серьезной СУБД. Необходимо отметить, что ориентация на передовую технологию и современное оснащение АРМ потребовало пересмотра подходов к проектированию ИБД.

Основными особенностями проектирования являются:

- использование готовых программных и алгоритмических решений при построении баз данных;
- широкое применение средств автоматизации проектирования (CASE технологий);
- постоянное увеличение объема задач, связанное с детальной формализацией предметной области.

Рассматривая изменение функций ИБД, в будущем необходимо считать, что он должен являться корпоративным хранилищем информации, которой пользуются все

компоненты ОТС, и гарантом ее сохранения. Однако большие возможности современных ПК не требуют обязательной работы каждого АРМ или подсистемы с ИБД, позволяя каждой отдельной подсистеме иметь свою собственную оперативную базу данных. Конечно, информация общего характера, зависящая от внешних данных или определяемая на множестве других параметров, должна храниться централизованно.

При этом обеспечивается:

—установление широкой сети предметных связей на множестве данных;

145

—быстрый поиск и оперативное предоставление предметно-зависимой информации (что особенно важно для СППР);

—образование единого информационного поля для всех подсистем и АРМ.

2.3. Глобальная вычислительная сеть Министерства. Глобальная (корпоративная) вычислительная сеть (ГВС) Министерства создается с целью объединения информационных узлов (центрального, предметно-аналитического, регионального уровней) в единую информационную сеть. Каждый узел может состоять из одной или нескольких локальных вычислительных сетей (ЛВС), а также и из отдельно стоящего ПК, имеющего телекоммуникационную связь.

Создание ГВС решает проблему обмена данными между территориально-удаленными узлами. Для объединения узлов используются основная и альтернативная системные шины. Основная системная шина состоит из выделенных каналов, альтернативная - из коммутируемых. Передача данных между узлами, подключенными к основной системной шине, осуществляется как путем использования средств передачи данных режима связи «online» (Ftp, монтирование удаленных файловых систем), так и средств передачи данных для режима связи «offline» (электронная почта). Передача данных между узлами, хотя бы один из которых подключен через альтернативную системную шину, осуществляется исключительно путем использования электронной почты.

Создаваемая ГВС базируется на выделенных телекоммуникационных UNIX серверах, постоянно принимающих и отправляющих данные, которые входят в состав ЛВС.

2.3.1. Локальные вычислительные сети. Основными элементами ГВС являются ЛВС министерства. ЛВС создаются как гетерогенные сети, допускающие использование различных операционных систем: UNIX, NOVELL, WINDOWS NT на серверах и операционных систем DOS, WINDOWS, WINDOWS 95, OS/2 на рабочих станциях. Как основная операционная система для серверов применяется ОС UNIX.

В качестве основного транспортного низкоуровневого сетевого протокола используется протокол TCP/IP.

2.3.2. Электронная почта. Система электронной почты Министерства создается как транспортное средство передачи данных между пользователями ОТС «Информ-Чернобыль».

Выделяется пять уровней:

1. Пользователи центрального узла;
2. Пользователи узлов управлений Министерства;
3. Пользователи территориально удаленных узлов;
4. Транспортные узлы, провайдеры сети Internet;
5. Абоненты международной сети Internet.

Таким образом, Министерство будет использовать местные узлы-провайдеры сети Internet, сети для обеспечения надежной работы и подключения к международной сети.

2.4. Техническое обеспечение. ОТС является сложной технической системой, в которой представлены практически все виды электронно-вычислительных средств, присутствующие сегодня на рынке современной вычислительной техники, и даже кратко охарактеризовать используемое обеспечение не представляется возможным. Отметим лишь, что в данный момент в системе присутствует разнородная вычислительная техника, начиная от персональных ЭВМ и заканчивая RISK-платформами ведущих производителей.

146

2.5. Безопасность системы. Одним из ключевых моментов функционирования ОТС является обеспечение безопасности. Под угрозой безопасности ОТС понимаются действия,

которые могут привести к уничтожению, искажению или несанкционированному использованию информационных ресурсов ОТС, включая информацию, которая хранится, передается или обрабатывается в системе программными и аппаратными средствами.

Проектные решения в части обеспечения защиты от нарушения и потери информации дополнительно предусматривают организацию резервного копирования, поддержку дублирования информации, а также использования комплекса антивирусных программ и т. д.

2.6. Надежность системы. Проектные решения в части обеспечения надежности функционирования ОТС базируются на комплексе следующих мероприятий:

- определение перечня аварийных ситуаций, возникающих в процессе работы ОТС, и способы реакции на них;

- включение в разрабатываемые системы дублирующих режимов, особенно по связи с другими подсистемами;

- обеспечение обмена информацией различными способами: по коммуникационным каналам связи, путем использования твердых копий (ГМД), путем ручного ввода информации;

- организация контроля функционирования ОТС на центральном уровне.

Предусматривается также защита от перебоев электропитания на аппаратном уровне источниками бесперебойного питания.

3. Этапы разработки. Исходя из раскрытых ранее подходов и методов организации работ по созданию ОТС выделены следующие очереди разработки и освоения системы.

Первая очередь системы представляет собой набор АРМ, обеспечивающих автоматизацию отдельных функций управления. Находится в стадии завершения (в настоящее время разработаны и функционируют 72 АРМ центрального уровня и 13 регионального).

Вторая очередь системы реализуется путем создания подсистем, которые обеспечивают полный набор автоматизированных функций управления и ориентированы на единое информационное поле. Для создания подсистем группы АРМ объединяются локальными вычислительными сетями (сегментами) и коммуникационными каналами связи. Уже сейчас разрабатывается 50 подсистем, в том числе 15 - центрального уровня, 11 - предметно-аналитических и 24 - региональных. Первые 3 подсистемы аппаратно созданы, продолжается программная работа и их наладка. Третья очередь - это интеграция подсистем в единую систему с подключением удаленных (предметно-аналитических и региональных) узлов и создание глобальной информационной сети, самое главное, ввод в действие СП ПР.

Особенности проектирования и реализации ОТС «Информ-Чернобыль».

В работе над ОТС «Информ-Чернобыль» выкристаллизовалось несколько принципиальных различий в организации проектирования системы и создания ее программного обеспечения, а также в практической реализации задуманного:

- построение системы по двум направлениям: **нижнее** - построения АРМ и решения отдельных задач компьютеризации управления и **верхнее** - системной проработки структуры в целом и разработки идеологии СППР высшего уровня руководства;

147

- наличие большого количества организаций-разработчиков, ориентированных каждая на свою подсистему, на программирование одного АРМ или даже решение отдельной задачи. Привлечение к работе над системой представителей различных школ резко повысило потенциальные возможности проектирования, а культивируемые условия открытого обсуждения достижений и недостатков, взаимный показ и обсуждение результатов привели к созданию обстановки постоянной мозговой атаки и соревновательности, способствовали активному обмену идеями и находками, заставили исполнителей работать особо требовательно, качественно и быстро. Естественно, что в таких условиях резко возросла роль координирующих структур, и с учетом этого, Министерством был проведен тендер (по международным правилам) на роль главного конструктора ОТС «Информ-Чернобыль»;

- изменение отношения к вопросу руководства работой по созданию ОТС. В Минчернобыле вся ответственность за разработку системы возложена на одного из заместителей Министра (лицо, принимающее решение ЛПР). В отличие от обычных

руководителей таких разработок, которые ограничивают свою роль проведением заранее подготовленных совещаний и утверждением готовых решений, ЛПР в Минчернобыле сам является идеологом и постановщиком одной из наиболее продвинутых пилотных подсистем, а также наиболее сложного блока системы - СППР;

— отказ от общепринятой практики создания автоматизированных систем управления силами специально созданных информационно-вычислительных центров (ИВЦ) или проектно-конструкторских бюро (ПКБ), так как известный опыт такой работы свидетельствует, что из-за обстановки келейности, замкнутости этих организаций и гиперболизации собственных интересов коллективов в большинстве случаев не получен сколь-нибудь значительный практический результат. Если всю работу по внедрению компьютерных технологий в сферу управления разделить на 3 фазы (создание программ и технической базы, эксплуатация программных продуктов, сервисное обслуживание техники и наполнение баз данных), то в ОТС «Информ-Чернобыль» первая и третья фазы сознательно переданы квалифицированным сторонним организациям (на договорной основе). Вторая - самая ответственная фаза - оставлена коллективам Минчернобыля, областных управлений, предметно-аналитических узлов. Таким образом, эти коллективы, пройдя необходимое обучение, становятся в полном составе персоналом некоего ИВЦ. Это позволяет поставить на повестку дня задачу коренного изменения технологии управленческой работы по всем звеньям Министерства.

Получено 11.04.96

148

УДК 681.3.06

В. Я. Пинчук, В. М. Калинин, С. А. Ежов
**АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ И ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ
СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УПРАВЛЕНЧЕСКОЙ СФЕРЕ**

Анализируется история развития систем поддержки принятия решений (СППР), рассматриваются вопросы создания СППР, внедряемых в управленческую сферу. Отмечаются особенности построения систем подобного класса, а также предлагается подход в организации банка данных для СППР.

В условиях возрастания потоков информации, вызванного количественными и качественными изменениями в государственной, хозяйственной и социальной сферах, действующая система управления неэффективна. Это обусловлено, в частности, ограниченной пропускной способностью человека как системы обработки информации и малой численностью управляющего персонала. Повышение эффективности управления возможно на базе персональной вычислительной техники, используемой для сбора и обработки информации, что позволяет реализовать качественно новые принципы управления сложными системами, такими, например, как Министерство по делам защиты населения от последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Преимущества внедрения новых информационных технологий в сферу управления заключаются, прежде всего, в их ориентации на решение неформализованных задач, в возможности получить обоснованное и эффективное решение, провести анализ и оценку предлагаемых стратегий. Реализующие эти качества системы представляют собой совокупность средств автоматизации, обеспечивающих деятельность лица или лиц, принимающих решения, и носят название систем поддержки принятия решений (СППР).

Несмотря на бесспорную полезность внедрения СППР, этот класс систем развивался неравномерно, что в значительной мере связано с господствующими в тот или иной исторический период развития информационных технологий взглядами на роль и место «интеллектуальных» систем. Выделение СППР в самостоятельный класс систем наметилось к началу 70-х годов как следствие развернувшегося ажиотажа вокруг экспертных систем. СППР (в зарубежной литературе - Decision Support Systems, DSS) предназначались для информационно-моделирующей компьютерной поддержки многоэтапных итерационных процессов принятия решений конечными пользователями в слабо- и неструктурированных проблемных областях (планирование, управление, проектирование, конструирование и т. п.)

[1, 2]. Основное направление развития СППР первого поколения заключалось в практическом опробовании отдельных положений теории искусственного интеллекта и теории принятия решений. Итогом первого этапа явилась разработка общей концепции построения СППР.

В следующее десятилетие темпы создания и внедрения СППР значительно снизились в связи с падением интереса к системам с искусственным интеллектом (к экспертным системам в первую очередь) как не оправдавшим надежд конечных пользователей. Пути развития СППР второго поколения были обусловлены общей тенденцией развития информационных систем в направлении поддержки коллективной работы и распределенной сетевой обработки данных. В этот период наряду с совершенствованием теоретических

© В. Я. Пинчук, В. М. Калинин, С. А. Ежов, 1998

149

основ построения СППР уточнялись и конкретизировались требования, предъявляемые к системе со стороны пользователей. Особенности СППР второго поколения являются:

построение и оформление баз данных в виде специфических хранилищ - баз знаний, баз моделей и баз сценариев;

выделение ядра СППР и размещение его совместно с базами данных в информационном центре на майнфрейме;

вынесение диалоговой подсистемы на удаленный терминал (терминалы).

Базовая модель индивидуальной СППР, т. е. СППР, предназначенной для одного пользователя и устанавливаемой на одной локальной машине, как правило, содержит все указанные компоненты, интегрированные в единую систему.

Третья волна развития СППР находится в фазе зарождения (начало 90-х годов) и вызвана возобновлением интереса к экспертным системам и другим системам искусственного интеллекта на базе возросших возможностей вычислительной техники и широкого внедрения объектно-ориентированных технологий. Существенный вклад в этот процесс, безусловно, внесут и такие, казалось бы, малозначительные факты, как появление первого аппаратно реализованного процессора с нечеткой логикой и первого приложения для WINDOWS, реализующего функции калькулятора с нечеткой арифметикой.

Интеграция традиционных СППР с экспертными системами качественно усиливает и дополняет функциональные возможности этих систем. Можно выделить три базовые архитектуры интегрированных интеллектуальных СППР:

системы, основанные на знаниях (KBS-системы), включающие в себя три основных компонента: системы языков с языковыми процессорами, процессор проблем (DSS-машины) и систему управления базой знаний;

системы, основанные на глобальном объединении СППР и экспертных систем в единую интеллектуальную систему поддержки всего жизненного цикла выработки и реализации решений;

системы, основанные на целевом объединении отдельных компонентов СППР, экспертных систем и других средств и технологий нового поколения, такие как CASE-системы, HDD-средства и т. п.

По мнению экспертов, СППР последнего поколения аккумулируют следующие основные особенности:

полное использование потенциала настольных систем и сред распределенной обработки;

интеграция различных архитектурных решений без каких-либо ограничений, т. е. построение абсолютно открытых систем;

параллельная оптимизация архитектуры СППР и бизнес-процессов, поддерживаемых с помощью ресурсов;

достижение качественно нового уровня производительности, гибкости и динамизма организации системы;

распространение методологии проектирования экспертных систем на СППР;

расширение возможностей коллективной работы и принятия групповых решений.

Перспективной архитектурой для СППР считается рациональное сочетание централизованной и децентрализованной организации системы с преимущественным уклоном в сторону централизованной модели («слабая» станция - «мощный» сервер).

150

СППР такого типа характеризуются активным использованием ресурсов рабочей станции, когда основная часть обрабатываемых данных сосредоточена в личных файлах пользователя. Однако при решении базовых задач с привлечением группы экспертов и организации информационно-поискового режима большую часть нагрузки разумно перенести на централизованные ресурсы, чтобы избежать многократной передачи данных из корпоративного банка данных на рабочую станцию.

В качестве путей достижения перечисленных выше качеств предлагается несколько взаимосвязанных методов и средств разработки СППР. Это, прежде всего, объектно-ориентированный подход как в проектировании, так и в техническом осуществлении проекта, органичное внедрение которого обусловлено схожестью с фреймовым представлением знаний.

Вторая группа методов создания СППР базируется на оперативной аналитической обработке (Online Analytical Processing, OLAP). Суть применения OLAP заключается в создании надстройки над базой данных СППР, выполняющей функции итерактивной обработки запросов, многопроходного анализа, выборки данных по многомерным ключам, моделирования и получения производных результатов путем агрегирования и логического объединения данных, прогнозирования и статистического анализа. OLAP-средства обеспечивают эффективную работу в распределенной среде и на различных платформах.

Однако, несмотря на все преимущества, предоставляемые рассмотренными средствами, применение их при разработке собственной СППР невозможно по ряду веских причин: высокая стоимость подобных продуктов; ориентация на конкретный вид решаемых задач в одной отдельно взятой предметной области, и, как следствие, отсутствие механизма интеграции слабосвязанных или непересекающихся наборов данных; использование готовых проектных и программных решений, ограничивающих гибкость системы и возможности по ее наращиванию.

Исходя из этого и с учетом особенностей архитектуры создаваемой организационно-технической системы для Минчернобыля, целесообразно развернуть работы по созданию уникальной (в смысле перечня решаемых задач и выполняемых функций) СППР для руководящего состава Министерства. Очевидно, что такая система должна создаваться на базе известных новейших подходов к построению систем подобного класса. Так как информационное поле, в котором предстоит работать СППР, охватывает несколько разнородных предметных областей (это и географические данные, и строительство, и здравоохранение, и социально-экономические вопросы и т. д.), то одним из важнейших качеств будущей системы должна стать эффективная обработка и визуализация разнотипных данных и возможность установления различного вида связей между ними.

Одним из способов решения этой трудной задачи является оптимальное (или, по крайней мере, рациональное) построение хранилища данных, призванного обеспечивать СППР необходимыми информационными ресурсами. Достаточно часто под оптимальным построением понимают решение задач, связанных, в первую очередь, с **оперативным** предоставлением **любой** информации, хранящейся в системе. При таком подходе хранилище данных просто обрушивает поток малоценной и избыточной информации на пользователя, вместо того, чтобы помогать ему принимать обоснованные **решения** с минимальными затратами времени и сил. Результатом работы действительно эффективной СППР

151

должны быть именно решения, а не информация. Отсюда вытекает и главное требование к банку данных, обслуживающему СППР, - предоставлять только необходимую информацию.

Не останавливаясь на особенностях системотехнической реализации банка данных и опираясь на отмеченный выше постулат, можно представить банк данных в виде совокупности трех подсистем, обеспечивающих совместно с СППР моделирование процесса

принятия решений: подсистемы поддержки принятия решений, подсистемы информационного сервиса и подсистемы управления информационными ресурсами.

Подсистема поддержки принятия решения ориентирована на пользователя. Ее назначение - обеспечивать пользователя специально подготовленной, обработанной и оформленной соответствующим образом информацией в объеме, необходимом для принятия конкретных решений. Главные требования, предъявляемые к данной подсистеме, следующие:

- учет контекста обрабатываемой информации, предшествующих результатов и состояния (режима работы) СППР в целом;

- эффективная фильтрация, прореживание и обобщение информации на основе элементарных логических операций;

- объединение информации в блоки по различным критериям и функциональным признакам;

- установление и отслеживание динамических (временных) и статических связей между различными типами данных;

- передача в СППР затребованной информации в форме, обеспечивающей удобство ее предъявления пользователю и эффективную работу с ней.

Подсистема информационного сервиса, по сути дела, является базисом, обеспечивающим функционирование подсистемы поддержки принятия решения. Основное назначение этой подсистемы - оперативно поставлять запрашиваемые данные. Очевидно, что источником запроса может быть не только подсистема поддержки принятия решения банка данных, но и СППР. Последнее имеет место, например, в случае организации поиска некоторых сведений, несвязанных с принимаемым решением. Прототипом построения подсистемы информационного сервиса может служить стандартная система управления базами данных, удовлетворяющая требованиям оперативности извлечения данных, масштабируемости, поддержки быстрого поиска и запросов.

Подсистема управления информационными ресурсами обеспечивает защиту информации путем ее кодирования, контроль логической целостности и непротиворечивости данных, восстановление структуры банка данных после сбоев, удаление избыточных и устаревших данных, резервное копирование и администрирование банка данных в целом. Важной функцией подсистемы управления информационными ресурсами является разграничение доступа и контроль за доступом к информации пользователей системы.

В заключении рассмотрения перспектив развития СППР отметим, что средства обработки информации банка данных ни в коей мере не подменяют СППР. Они являются «интеллектуальными» лишь настолько, насколько требуется для нахождения и предоставления информации, специфицируемой по множеству различных признаков. Одним из методов объединения контекстно зависимой информации **уже в СППР** может быть ситуационный подход.

Следующий вопрос связан с отношением СППР к автоматизации управленческого труда. На наш взгляд, появление класса систем поддержки принятия решений было обусловлено спецификой управленческой деятельности. Дело в том, что при решении проблем, связанных с оперативным и стратегическим руководством производства, отраслью, любой организацией, существует большое количество релевантной информации, которая не может быть заранее выявлена и занесена в систему в виде файлов и правил. В этом случае экспертной системе пришлось бы иметь дело со множеством неформализованных сведений. Очевидно, что для принятия решения с учетом всех факторов необходимо организовать интерактивный процесс общения пользователя и ЭВМ. Данное требование реализуется в СППР, имеющих хорошо развитый интерфейс поддержки для наблюдения и контроля процесса решения проблем, получения объяснений и рекомендаций, оперативного изменения данных, правил вывода и стратегий рассуждений, получения дополнительных сведений о проблемной области. Именно эти качества отличают СППР от других интеллектуальных систем, в том числе и от экспертных систем.

СППР в управленческой сфере имеют дополнительные специфические отличия. Первая особенность связана с переопределением приоритетов для множества выполняемых функций. Основные акценты для управленческих СППР переносятся на обеспечение доступа к любой информации, эффективной ее оценки и предложение обоснованных, привязанных к текущей ситуации, вариантов решений (рекомендаций).

Для управленческих систем уникальны следующие особенности: обеспечение высокого комфорта работы с СППР на основе учета распорядка дня, текущей загруженности руководителя делами, его индивидуальных психофизических особенностей;

наличие большого количества вспомогательных режимов и функций, сопряжение с другими «офисными» программами, так называемыми бизнес-компонентами и бизнес-приложениями, и обеспечение их полной интеграции в единой среде СППР;

выделение режимов работы СППР не по типам обрабатываемых данных и способам обработки информации, а на основе учета стадий управленческой деятельности и с учетом содержания задач, которые приходится решать руководителю;

наличие расширенного механизма обобщения, прореживания, сжатия и фильтрации информации для обеспечения ее рационального предъявления пользователю (визуализации).

Для управленческих СППР характерно сочетание индивидуального (самостоятельного) и группового методов принятия решений. И если в первом случае все стадии процесса принятия решения проходят при непосредственном участии одного лица - руководителя, то при групповом методе общая проблема разбивается на совокупность отдельных областей, в которых работают профессионально подготовленные эксперты. Руководитель осуществляет общее руководство решением проблемы, а именно:

оценивает ситуацию в целом; производит расчет времени, необходимого для решения проблемы; распределяет задачи среди подчиненных; контролирует работу; собирает и структурирует полученные результаты и сопутствующую информацию; вырабатывает окончательное решение проблемы и оформляет его в виде программы действий. Рассмотренная последовательность работы руководителя носит общий характер;

153

в ряде случаев отдельные этапы решения проблемы будут отсутствовать, например, в случае, когда руководитель берет на себя часть задач. Очевидно, что СППР должна предоставлять эффективную помощь на всех этапах решения проблемы. Следовательно, компонентами системы поддержки принятия групповых решений будут следующие:

планировщик задач, позволяющий назначать задания подчиненным, планировать их загрузку и контролировать своевременность выполнения заданий;

коммуникатор, построенный на базе систем электронной почты и телеконференций;

рабочая папка, позволяющая организовать сбор и хранение тематических материалов;

контролер, содержащий базу данных поставленных и выполненных заданий, принятых решений и поддерживающий функции организационного управления;

консультант - экспертная компонента, предоставляющая руководителю советы и информацию по различного вида вопросам;

эксперт - комплекс процедур экспертного многокритериального оценивания, анализа и выбора вариантов решений, предложения рекомендаций и стратегий решения проблем.

Кроме того, в состав СППР могут входить следующие компоненты, или подсистемы: прогнозист - подсистема статистического прогнозирования, содержащая базу математических моделей соответствующего типа; решатель - подсистема для проведения математических расчетов в экономической, финансовой и других областях; иллюстратор - совокупность процедур визуализации текстовой, числовой, графической, картографической, табличной и другой информации; редактор - подсистема подготовки документов и обработки текстовой информации; записная книжка; деловой дневник (ежедневник, еженедельник, ежегодник); календарь; телефонная (адресная) книга; библиографический справочник.

Как видим, круг вопросов, которые можно успешно решать при использовании СППР, обширен. В то же время методы их решения в настоящее время только разрабатываются. Современные информационные технологии предоставляют нам прекрасные и мощные средства автоматизации управленческой деятельности. Поэтому важной задачей является

всестороннее исследование, обоснование и выбор путей внедрения систем поддержки принятия решений в управленческую сферу.

1. Редько В. Н., Сергиенко И. В., Стукало А. С. Прикладные программные системы. Архитектура. Развитие. - Киев: Наук, думка, 1992. - 320 с.
2. Лескин А. А., Мальцев В. Н. Системы поддержки управленческих решений. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1990. - 167 с.

Получено 11.04.96

154

УДК 621.039

В.В. Тришин, А.Н. Берлизов, Г.Н. Коваль, А.А. Третьяков
ОЦЕНКА ДОЗОВЫХ ПОЛЕЙ
ПРИ ОБРАЩЕНИИ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ
НА ПЕРВОЙ ОЧЕРЕДИ ПРОИЗВОДСТВ КОМПЛЕКСА «ВЕКТОР»

Представлена методика статистического моделирования и результаты выполненных на ее основе расчетов дозовых полей при обращении с радиоактивными отходами на первой очереди производств комплекса «Вектор».

1. ВВЕДЕНИЕ

Строительство первой очереди комплекса производств «Вектор» по дезактивации, транспортировке, переработке и захоронению радиоактивных отходов (РАО) является мероприятием государственного масштаба, которое призвано стабилизировать радиационно-гигиеническую обстановку на загрязненных в результате чернобыльской катастрофы территориях, а также в целом на территории всей Украины. Реализация принятых в проекте технических решений по локализации РАО позволит предотвратить неконтролируемое распространение радиоактивных веществ с поверхностными и фунтовыми водами, а также в результате вторичного ветрового переноса или несанкционированного техногенного вмешательства.

Проектом первой очереди комплекса предусмотрено возведение приповерхностных модульных хранилищ двух типов (далее просто хранилища I и II) для локализации твердых РАО низкой и средней активности. Хранилище I представляет собой четырехъярусную конструкцию, составленную из 4668 железобетонных контейнеров. Технология захоронения РАО в этих хранилищах предусматривает предварительную подготовку контейнеров (смена временной крышки на постоянную, омоноличивание, гидроизоляция), транспортировку подготовленных контейнеров на площадку хранилища и их установку в соответствии с определенной схемой расположения (14x94 на нижних трех ярусах и 8x90 - на верхнем). Подготовку контейнеров предусматривается производить в специальном здании.

Хранилище II состоит из шести железобетонных модулей, предназначенных для захоронения преимущественно крупногабаритных РАО. Сооружение модулей на площадке хранилища предусматривается производить по мере их заполнения, причем, одновременно открытыми в любой момент времени будут только два из них.

Сооружение хранилищ обоих типов будет производиться на специальных площадках, оборудованных многослойным гидроизоляционным экраном. Заполненные хранилища будут обваловываться сорбционным слоем глины, а также дренажным и растительным слоями грунта. Всего проектом предусмотрено строительство 16 хранилищ I и 40 - II общей емкостью 500 тыс. м³ РАО.

С точки зрения обеспечения радиационной безопасности важным является прогноз дозовых нагрузок на персонал, выполняющий те или иные радиационно опасные транспортно-технологические операции по доставке, разгрузке-погрузке и подготовке контейнеров с РАО, а также при их непосредственном захоронении. Не менее важным для прогноза дозозатрат обслуживающего персонала при долговременной эксплуатации объекта является также оценка мощности дозы на поверхности хранилищ.

© В.В.Тришин, А.Н.Берлизов, Г.Н. Коваль, А.А.Третьяков, 1998

155

Исходя из этого, нами проведены расчеты дозовых полей:

- для контейнеров хранилища I;
- для участков укупорки и отстоя в здании подготовки контейнеров к захоронению;
- при сооружении хранилищ РАО обоих типов;
- на поверхности обвалованных хранилищ РАО. Кроме того, для ситуаций, в которых прогнозные значения мощности дозы превышают регламентируемые уровни, был проведен расчет биологической защиты обслуживающего персонала.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Расчет физических характеристик поля излучения источников ионизирующих частиц в большинстве практически важных случаев сводится к вычислению линейных функционалов от плотности потока частиц $\varphi(x)$ в шестимерном фазовом пространстве $\Gamma = \{r, \Omega, E\}$:

$$F = \int_r g(x)\varphi(x)dx, \quad (1)$$

где r - радиус-вектор точки трехмерного пространства, Ω - единичный вектор направления движения частиц, E - энергия частиц, $g(x)$ - функция отклика детектора, характеризующая связь рассматриваемой величины F с плотностью потока $\varphi(x)$.

Последняя является решением линейного интегродифференциального уравнения переноса Больцмана. Точные решения уравнения переноса существуют лишь для ограниченного числа модельных ситуаций, которые далеко не исчерпывают обширный круг практических задач. По этой причине широкое применение нашли приближенные методы решения указанного уравнения, среди которых: методы полиномиальных разложений, методы дискретных ординат, групповые и асимптотические методы и пр.

В основу настоящих расчетов положен метод статистических испытаний (метод Монте-Карло), описанный в литературе [1-3]. Формальным основанием применимости данного метода служит вероятностная интерпретация интегральных уравнений Фредгольма II рода, к которым сводятся многие задачи теории переноса ядерного излучения. Сущность метода Монте-Карло состоит в том, что сложный стохастический процесс прохождения частиц в веществе рассматривается как последовательность конечного числа элементарных случайных событий, воспроизводящих движение (траекторию) определенной частицы. Анализ достаточно большого количества траекторий позволяет сразу получать оценки функционалов типа (1). Достоинствами метода являются относительная простота и наглядность вычислительного алгоритма, а также его приспособленность к решению задач переноса в многомерных и сложных геометриях.

Необходимо отметить, что требование статистической обеспеченности выборки, ограничивавшее до недавнего времени использование метода Монте-Карло областями пространства со сравнительно небольшими линейными размерами, в настоящее время в достаточной степени может удовлетворяться ввиду значительного возрастания мощности вычислительной техники. Указанное обстоятельство ставит данный метод в ряд наиболее перспективных при решении широкого круга практических задач, среди которых важное место занимают проблемы радиационной безопасности.

156

Существенным моментом с точки зрения расчета дозовых полей, формируемых источниками фотонного излучения, является то, что метод Монте-Карло имеет одно весьма важное преимущество. Оно состоит в автоматическом учете в получаемой оценке суммарной мощности дозы вклада от рассеянного излучения, величина которого может достигать нескольких десятков процентов. Учет этого вклада при использовании других методов расчета производится обычно путем введения так называемых дозовых факторов накопления [1, 7]. Однако сильная зависимость факторов накопления от геометрии источников излучения, свойств поглощающих сред и энергии γ -излучения приводит к тому, что их корректный расчет представляет собой отдельную достаточно сложную задачу. Причем ее необходимо решать отдельно для каждого конкретного случая, поскольку применяемые довольно часто на практике параметризации факторов накопления не обладают достаточной степенью универсальности и, к тому же, не претендуют на высокую точность.

Линейный функционал, связывающий плотность потока γ -излучения $\Phi(r, E)$ и мощность эквивалентной дозы $H(r)$ в некоторой точке пространства r имеет вид

$$H(r) \text{Зв} \cdot \text{ч}^{-1} = \int_0^{E_0} h(E) \text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Зв} \cdot \text{ч}^{-1} \Phi(r, E) \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{МэВ}^{-1} dE, \quad (2)$$

где функция отклика детектора является произведением нормировочного множителя α , энергии γ -излучения E и линейного коэффициента истинного поглощения γ -излучения в воздухе μ_a :

$$h(E) = \alpha E \text{МэВ} \cdot \mu_a(E) \text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}. \quad (3)$$

Нормировочный множитель имеет следующий вид:

$$\alpha = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{эрг} \cdot \text{МэВ}^{-1} \cdot 3600 \text{с} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot k(E) \text{Зв} \cdot \text{г}^{-1}, \quad (4)$$

где k - коэффициент качества излучения. Получим выражение для оценки функционала (2) на основе имитационной схемы метода Монте-Карло.

Пусть $\{E_i\}$ - произвольное разбиение энергетического интервала $[0, E_0]$ спектра излучения источника, причем $\Delta_i = E_{i+1} - E_i$. Тогда спектральную плотность потока γ -квантов в произвольной точке пространства r можно оценить следующим образом:

$$\Phi_i(r) = \frac{N_i A_0}{\Delta_i \pi R^2 N_0}, \quad (5)$$

где N_i - число фотонов с энергией из промежутка Δ_i , случайные траектории которых пересекли сферу радиуса R с центром в точке r , A_0 - число квантов, испускаемых источником в единицу времени, N_0 - общее число произведенных испытаний. Тогда для мощности эквивалентной дозы имеем следующую оценку:

$$H(r) = \sum_i h_i \Phi_i(r) \Delta_i, \text{ где } h_i = \frac{1}{\Delta_i} \int_{\Delta_i} h(E) dE. \quad (6)$$

Переходя в (5) и (6) к пределу $\Delta_i \rightarrow 0$ и учитывая соотношения

$$\lim_{\Delta_i \rightarrow 0} h_i = h(E_i) \text{ и } \lim_{\Delta_i \rightarrow 0} \sum_i N_i = N,$$

нетрудно получить окончательное выражение:

$$H(r) = \frac{A_0}{\pi R^2 \cdot N_0} \sum_{i=1}^N h(E_i),$$

157

где суммирование, в отличие от (6), производится не по интервалам разбиения спектра излучения, а по случайным событиям, т.е. по всем N фотонам, прошедшим через сферу R . Таким образом, алгоритм расчета состоит в накоплении суммы (7) для совокупности точек, расположенных в интересующей области пространства и являющихся центрами сфер радиуса R (так называемых объемов наблюдения). Получаемые таким образом оценки мощности дозы являются усредненными по объемам наблюдения (нелокальными). Размеры области наблюдения выбираются исходя из требуемой детальности знания пространственного распределения дозы, а также приемлемого времени расчета, которое для получения удовлетворительной точности должно обеспечить накопление достаточно большого числа (не менее тысячи) слагаемых в сумме (7).

Отметим, что описанная процедура расчета не предусматривает накопление энергетических спектров в точке наблюдения, что исключает необходимость хранения больших объемов информации в оперативной памяти ЭВМ. В тоже время, задача расчета энергетических и угловых распределений фотонного излучения также может быть решена в рамках созданного программного пакета путем несложной модификации вычислительного алгоритма. Такая возможность была применена в пп. 5.5, 5.6 настоящей работы при расчете мощности дозы за массивной системой защиты.

Процесс моделирования случайных траекторий γ -квантов подробно изложен в литературе [1-3]. Он включает в себя вычисление случайной точки испускания кванта в источнике в соответствии с заданным распределением активности, длины свободного пробега, точки и типа взаимодействия в соответствии с полным и парциальными коэффициентами поглощения, а также моделирование случайных характеристик процесса

взаимодействия (энергии и углов разлета) и преобразование направления движения в случае рассеяния.

В этой работе линейные коэффициенты поглощения γ -излучения для различных сред вычислялись в узлах E_i шкалы энергии по данным [14] в соответствии с формулой

$$\mu = \rho \sum_i \mu_{mi} v_i, \quad (8)$$

где μ_{mi} , и v_i - массовый коэффициент поглощения и весовая доля i -го химического элемента в соединении, ρ - плотность соединения. Значения коэффициентов для промежуточных значений энергии вычислялись путем сплайн-интерполяции.

Ввиду больших линейных размеров излучателей и малого порядкового номера химических элементов, входящих в состав вещества РАО и конструкционных материалов контейнеров, при моделировании фотоэлектрического поглощения поведение вторичных частиц (фотоэлектронов и рентгеновских квантов) не рассматривалось. По этой же причине, при комптон-эффекте дальнейшее рассмотрение проводилось только для рассеянного γ -излучения.

Несколько слов следует сказать об оптимизации расчетной схемы. Цель оптимизации алгоритма статистического моделирования состоит, как правило, в уменьшении дисперсии конечных оценок при минимизации общего количества испытаний N_0 , что напрямую связано с точностью получаемых результатов и временем расчета. В ряде случаев удавалось повысить эффективность расчетной схемы за счет использования свойств симметрии излучателя. При этом дозовое поле рассчитывалось в пределах полупространства, либо в его четвертой или даже восьмой части. Кроме того, проводилось предварительное

158

исследование свойств излучателя к самопоглощению γ -квантов, в результате чего выделяли только ту часть его объема, которая давала преимущественный вклад в дозу. Также дополнительно исследовался вопрос взаимного экранирования излучателей, что в ряде случаев позволило исключить из рассмотрения те из них, вклад которых в мощность дозы в данной области пространства является пренебрежимо малым.

Следующее упрощение процедуры расчета достигалось за счет использования симметрий в расположении совокупности однотипных излучателей. В этом случае производилось выделение одной или нескольких «элементарных» геометрических конфигураций (ЭГК), состоящих из активного элемента (излучателя, дозовое поле которого рассчитывается) и ряда пассивных элементов (как правило, таких же излучателей, но выполняющих лишь функцию поглощения излучения активного элемента). После расчета дозового поля ЭГК, суммарное поле получается путем суперпозиции вкладов от отдельных активных элементов в соответствии с их пространственным расположением. Такая схема расчета позволяет адекватно учитывать влияние эффекта взаимного экранирования излучателей, что особенно важно в случае источников с большими линейными размерами.

Следует, однако, отметить, что имитационная схема метода Монте-Карло, применяемая в данной работе, не обладает наилучшими показателями эффективности. В то же время ее обычно рассматривают как первый и необходимый шаг на пути построения и использования более эффективных расчетных схем, основанных на методах уменьшения дисперсии - так называемых весовых алгоритмах Монте-Карло [5]. Дальнейшее развитие созданного программного пакета предполагает использование указанных алгоритмов.

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ОСНОВНЫЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ

Выбор исходных данных и приближений, используемых в расчете, диктуется требованием консервативности конечных оценок, в силу которого оцениваются максимально возможные дозовые нагрузки на персонал, а также требованием наиболее точного соответствия моделируемых ситуаций реальным параметрам источников излучения, геометрии и технологического процесса.

Исходя из указанных требований были определены параметры геометрии контейнеров (модулей) и характеристики РАО, значения которых приведены:

Параметр	Контейнер (хранилище I)	Модуль (хранилище II)
Геометрия	Параллелепипед	Параллелепипед
Размер, мм		
основание	1940x1940	9000x30000
высота	1850	7500
Толщина, мм		
основание	450	500
боковые стороны	220	500
постоянная крышка	450	500
временная крышка	3	Нет
Полезный объем V , м ³	2,1	1508
Коэффициент заполнения η	0,8	0,9
Материал		
контейнера	Бетон ($\rho_b = 2,3$ г/см ³)	Бетон ($\rho_b = 2,3$ г/см ³)
временной крышки	Железо ($\rho_{ж} = 7,87$ г/см ³)	Нет
Удельная активность РАО A_r , Ки/кг	10^{-3}	1
Вещество РАО	Песок ($\rho_{РАО} = 1,6$ г/см ³)	Песок ($\rho_{РАО} = 1,6$ г/см ³)

159

На основе этих данных рассчитывались производные величины:

- эффективная плотность вещества РАО - $\rho_{эфф} = \eta \cdot \rho_{РАО}$, где η - коэффициент заполнения контейнера или модуля, $\rho_{РАО}$ - плотность вещества РАО;
- активность РАО в одном контейнере (модуле) - $A = \eta \cdot \rho_{РАО} V A_r$ ($A = \eta V A_r$), где V - объем контейнера либо модуля, а A_r - удельная активность вещества РАО;
- число γ -квантов, испускаемых в единицу времени - $A_0 = A \sum_{ij} \zeta_i \omega_{ij}$ - где ζ_i - относительное содержание i -го радионуклида в веществе РАО, ω_{ij} - квантовый выход j -й линии.

Эти величины использовались при расчете эффективных коэффициентов поглощения γ -излучения (8), а также при нормировке результатов расчета в соответствии с (7).

При определении нуклидного состава РАО считалось, что из-за массивности защиты контейнеров и модулей непосредственный вклад β -частиц в суммарную дозу внешнего облучения будет пренебрежимо мал. Оценка косвенного вклада β -излучающих нуклидов за счет тормозного излучения конверсионных и β -электронов в веществе РАО и стенках контейнеров показала малость и этого пути формирования дозы. Результаты этих расчетов представлены в п.4 настоящей статьи. Таким образом, наиболее консервативные оценки дозовых нагрузок соответствуют приближению, когда вся активность РАО исчерпывается γ -излучающими радионуклидами. Среди последних были выбраны изотопы ^{137}Cs и ^{134}Cs , поскольку они характеризуются наибольшим содержанием в РАО чернобыльской зоны отчуждения. Отношение их концентраций принято равным 50/1, что характерно для рассматриваемых отходов на данный момент времени. Радионуклидный состав РАО приведен в табл. 1, где также указаны энергии и квантовые выходы γ -линий, которые учитывались при проведении расчетов. Объемное распределение активности в веществе РАО считалось равномерным.

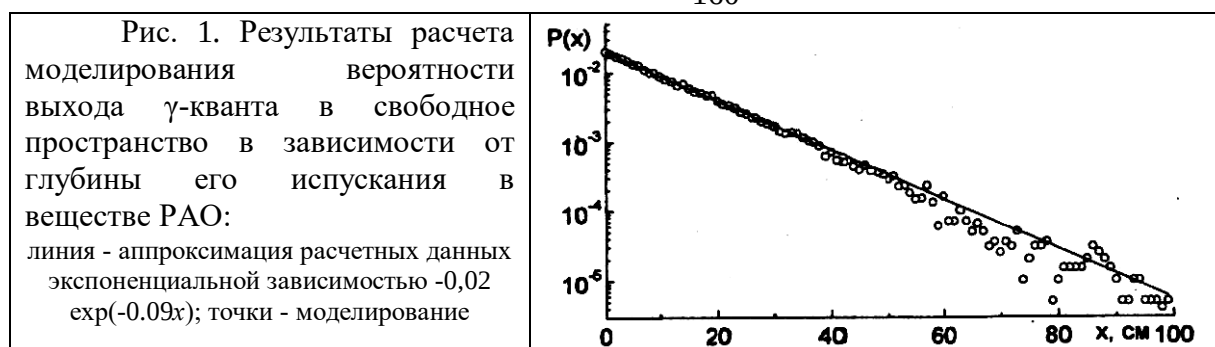
Следующее приближение, использованное при проведении расчетов, основано на утверждении о полном взаимном экранировании контейнеров и модулей с РАО. Другими словами, мощность дозы в определенной точке пространства определяется только видимыми из этой точки частями излучателей. Обоснованность данного приближения представлена на рис.1. Исходя из приведенной на рисунке аппроксимации легко получить, например, что 99,5 % интенсивности γ -излучения на поверхности РАО обуславливается толщиной порядка 60 см приповерхностного слоя излучателя. Другая оценка показала, что только порядка 25% γ -

квантов, испущенных в объеме контейнера (хранилище 1), достигают его внутренних стенок. Приведенные цифры указывают также на эффект сильного самоэкранирования РАО,

Таблица 1. Радионуклидный состав РАО и линии γ -излучения, учитываемые в расчетах

Нуклид	Относительное содержание ζ	Энергия γ -квантов, кэВ	Квантовый выход ω , расп ⁻¹	$\zeta\omega$
¹³⁷ Cs	0,98	661,6	0,846	0,829
¹³⁴ Cs	0,02	569,2	0,115	0,0023
		604,6	0,575	0,0115
		795,8	0,575	0,0115
		801,8	0,086	0,0017
		1038,4	0,023	0,0005

160



что при расчете позволило ограничиться рассмотрением лишь приповерхностного слоя радиоактивного вещества. Для модулей хранилища II это дало приблизительно трехкратный выигрыш в эффективности расчетной схемы.

4. ОЦЕНКА ВКЛАДА β -ИЗЛУЧЕНИЯ В СУММАРНУЮ МОЩНОСТЬ ДОЗЫ

Для оценки величины вклада β -излучения в суммарную мощность дозы были выполнены соответствующие расчеты дозовых полей в предположении, что вся активность РАО обусловлена исключительно β -излучателями. В табл. 2 приведены характеристики некоторых β -излучающих нуклидов, присутствие которых возможно в РАО чернобыльской зоны отчуждения. Там же приведены значения экстраполированных пробегов электронов в веществе РАО. Приведенные оценки пробегов существенно меньше линейных размеров контейнеров, ввиду чего, как отмечалось выше, непосредственный вклад электронов в мощность дозы за пределами контейнера ничтожно мал.

Возможным источником косвенного вклада электронов в мощность дозы является тормозное излучение, испускаемое β -частицами при прохождении в веществе РАО. В табл. 2 приведены значения относительного вклада радиационных потерь энергии при торможении электронов в веществе РАО, который оценивался по известной формуле Бете-Гайтлера. Видно, что вклад радиационных потерь достаточно мал и составляет 1-2 %. Однако при отсутствии γ -излучающих нуклидов в составе РАО, именно тормозное излучение будет практически единственным фактором, формирующим дозовое поле, и оценка мощности дозы в этом случае представляет собой определенный интерес.

Моделирование процесса прохождения тормозного излучения в веществах источника и защиты также производится при использовании метода статистических испытаний. Случайные энергии квантов вычисляются исходя из расчетных форм тормозных спектров в предположении о полном торможении электронов в поглощающих средах, что оправдано ввиду больших линейных размеров источников излучения и массивности контейнеров.

Таблица 2. Характеристики некоторых β -излучающих нуклидов

Нуклид	ΔI^s	$E_{\text{макс}}$, МэВ	$E_{\text{ср}}$, МэВ	$\beta/\text{расп}$, %	R, мм	$\eta_{\text{рад}}$, %	N_y , расп ⁻¹
⁹⁰ Sr	2 ⁻	0,546	0,196	100	1,5	0,86	0,0006
⁹⁰ Y	2 ⁻	2,274	0,936	99,98	8,4	1,77	0,018
¹³⁷ Cs	2 ⁻	0,512	0,174	94,1	1,4	0,84	0,0005
	2 ⁺	1,174	0,418	5,9	4	1,14	0,0037

161

Спектр тормозных квантов в этом случае дается выражением

$$\Phi(E_0, E_\gamma) = \int_{E_\gamma}^{E_0} \left(\frac{d\Sigma}{d\Sigma_\gamma} \right) \left(-\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE, \quad (9)$$

где, первый множитель под знаком интеграла - дифференциальное макроскопическое сечение излучения кванта с энергией в интервале $[E_\gamma, E_\gamma + dE_\gamma]$, а второй - тормозная способность вещества при фиксированной энергии электрона. Нижний предел интегрирования соответствует наименьшему значению энергии электрона, при котором возможно испускание тормозного кванта с энергией, а верхний - равен его начальной энергии. Приведенное выражение описывает тормозной спектр моноэнергетических электронов, каковыми, например, являются электроны внутренней конверсии. Для β -электронов распределение тормозных квантов по энергии находится путем свертки спектра (9) с функцией $F(E)$, описывающей форму энергетического распределения электронов β - распада:

$$N(E_\gamma) = \int_{E_\gamma}^{E_{\text{макс}}} F(E) \Phi(E, E_\gamma) dE, \quad (10)$$

где $E_{\text{макс}}$ - максимальная энергия β -спектра. Величины, входящие в (9), вычисляются по формулам из работ [6,7] для веществ с произвольным химическим составом, а форма β -спектра для переходов разной степени запрета рассчитывается по известным формулам теории β -распада.

Среднее число тормозных квантов, испускаемых на один β -распад в источнике можно найти интегрированием спектра (10). Соответствующие величины для квантов с энергией, большей 100 кэВ, приведены в последнем столбце табл. 2. Как следует из приведенных данных, наибольшее число тормозных квантов (f2 кванта на 100 распадов) испускается высокоэнергетичными электронами второго звена цепочки β -распадов $^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y} \rightarrow ^{90}\text{Zr}$. Следовательно, наиболее консервативной оценкой вклада тормозного излучения в мощность дозы будет оценка, полученная в предположении, что вся активность РАО определяется наличием радионуклида ^{90}Sr .

Сравнение результатов расчета пространственного распределения дозы для контейнера хранилища I, обусловленной тормозным излучением р-электронов из распада ^{90}Sr , с аналогичным расчетом дозы от γ -излучения ^{134}Cs и ^{137}Cs показало, что вклад тормозного излучения, как минимум, на 2 порядка меньше. Это, таким образом, обосновывает приближения п. 3, использованные при определении нуклидного состава РАО.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ДОЗОВЫХ ПОЛЕЙ

5.1. Дозовое поле контейнера хранилища типа I. На рис. 2 представлены результаты расчетов пространственного распределения мощности эквивалентной дозы для простейшей геометрической конфигурации, состоящей только из активного элемента - контейнера хранилища I. Как следует из рис. 2, а, где представлено дозовое поле в плоскости, секущей контейнер на высоте 1 м от его основания, в ближней зоне (на расстояниях $< 2 \div 3$ м) распределение дозы является существенно неравномерным с характерными направлениями, перпендикулярными боковым граням контейнера.

162

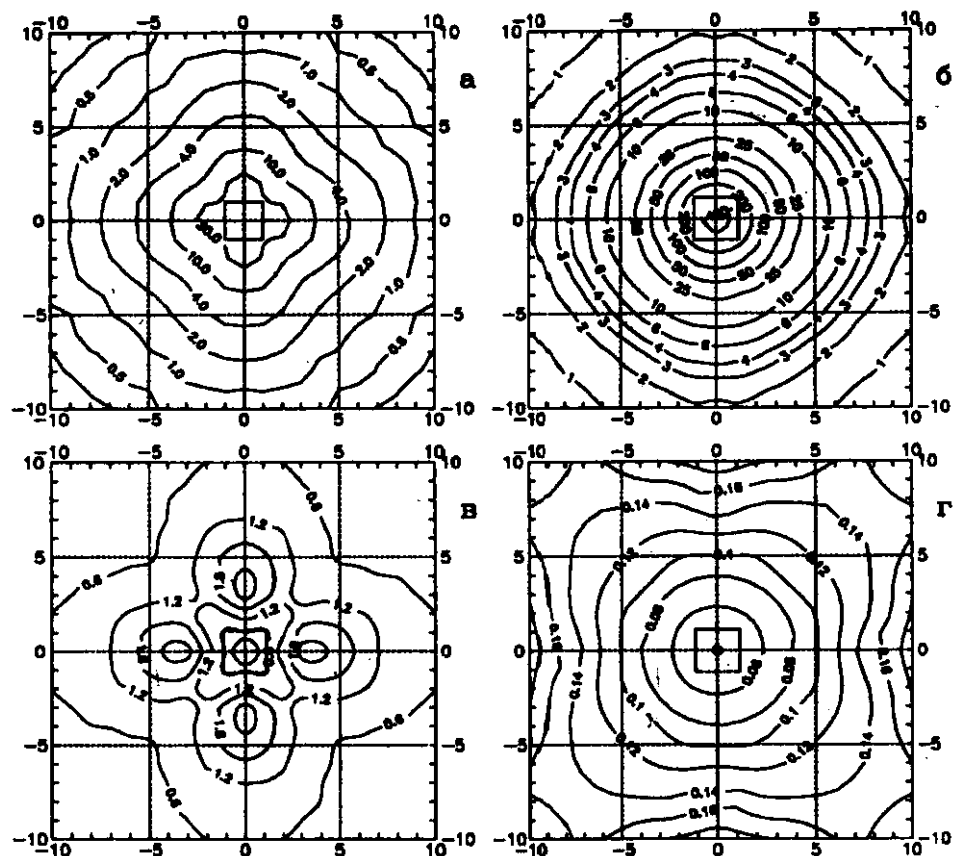


Рис. 2. Пространственное распределение мощности дозы, мкЗв/ч, для контейнера хранилища I:

а - в плоскости, секущей контейнер на высоте 1 м от основания; б, в - на высоте 1 м над контейнером с временной и постоянной крышкой; г - на высоте 10 м над контейнером с постоянной крышкой. По осям - расстояние, м

Для контейнера с временной крышкой пространственное распределение дозы на высоте 1 м от его верхней грани становится уже практически изотропным, что видно из рис. 2, б. Аналогичный расчет для контейнера без крышки незначительно отличался в распределении дозы по сравнению с рис. 2, б. Отличия в абсолютных значениях дозы также оказались небольшими и составили менее 10-20 % во всей расчетной области пространства.

Изолинии на рис. 2, в характеризуют дозовое поле омоноличенного контейнера на высоте 1 м от его верхней грани. Наличие четырех максимумов в направлении боковых сторон контейнера является характерной особенностью представленного распределения, что объясняется вдвое меньшей толщиной боковых стенок по сравнению с толщиной постоянной крышки (см. данные на с. 159). Распределение мощности дозы на высоте 10 м от верхней грани этого же контейнера представлено на рис. 2, г.

5.2. Здание подготовки контейнеров к захоронению. На рис. 3 представлены изолинии мощности эквивалентной дозы на участке укупорки здания подготовки контейнеров к захоронению. Там же обозначены контуры 6 рядов, содержащих по 9 контейнеров с РАО каждый. Для получения наиболее консервативных оценок считалось, что все контейнеры накрыты временными крышками.

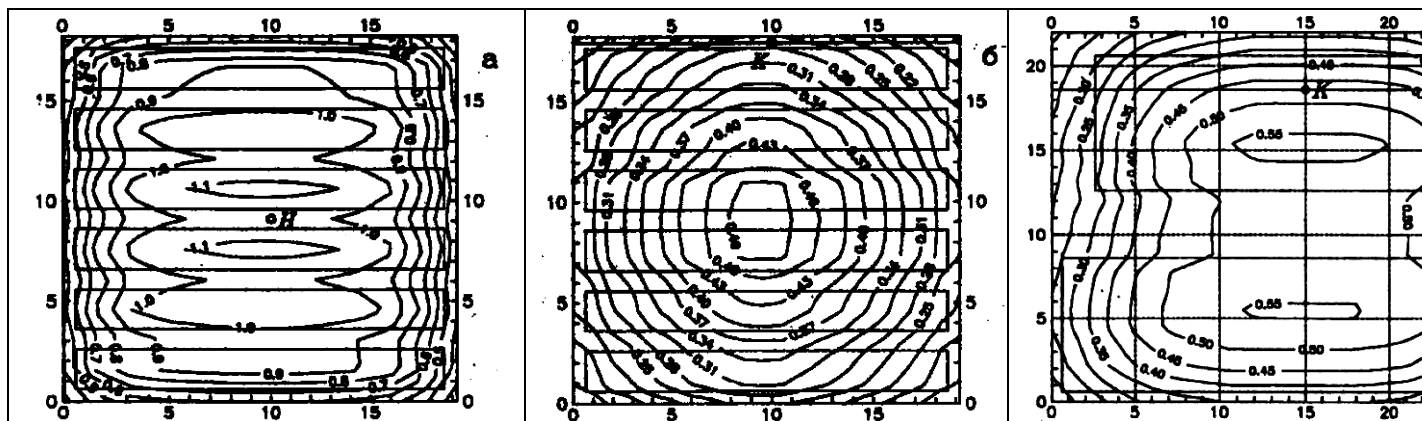


Рис. 3. Пространственное распределение мощности дозы в здании подготовки контейнеров к за
а, б - на уровнях работы обслуживающего персонала и крановщика на участке укупорки, мЗв/ч; в - на уровне работы крановщика на участке отстоя, мкЗв/ч. Обозначены контуры контейнеров и линия работы крановщика. По осям - расстояние, м.

Максимальная мощность дозы на уровне работы персонала (точка *H* на рис. 3, *a*) составляет приблизительно 1 мЗв/ч, что существенно превосходит требования по проектной мощности эквивалентной дозы для лиц категории А: для помещений постоянного пребывания персонала - 14 мкЗв/ч и для помещений, где персонал пребывает не более половины рабочего времени, - 29 мкЗв/ч.

Распределение мощности дозы на уровне работы крановщика представлено на рис. 3, б. Максимальное значение дозы на линии его работы (точка *K*) составляет примерно 260 мкЗв/ч, что также превосходит нормируемые проектные значения мощности дозы.

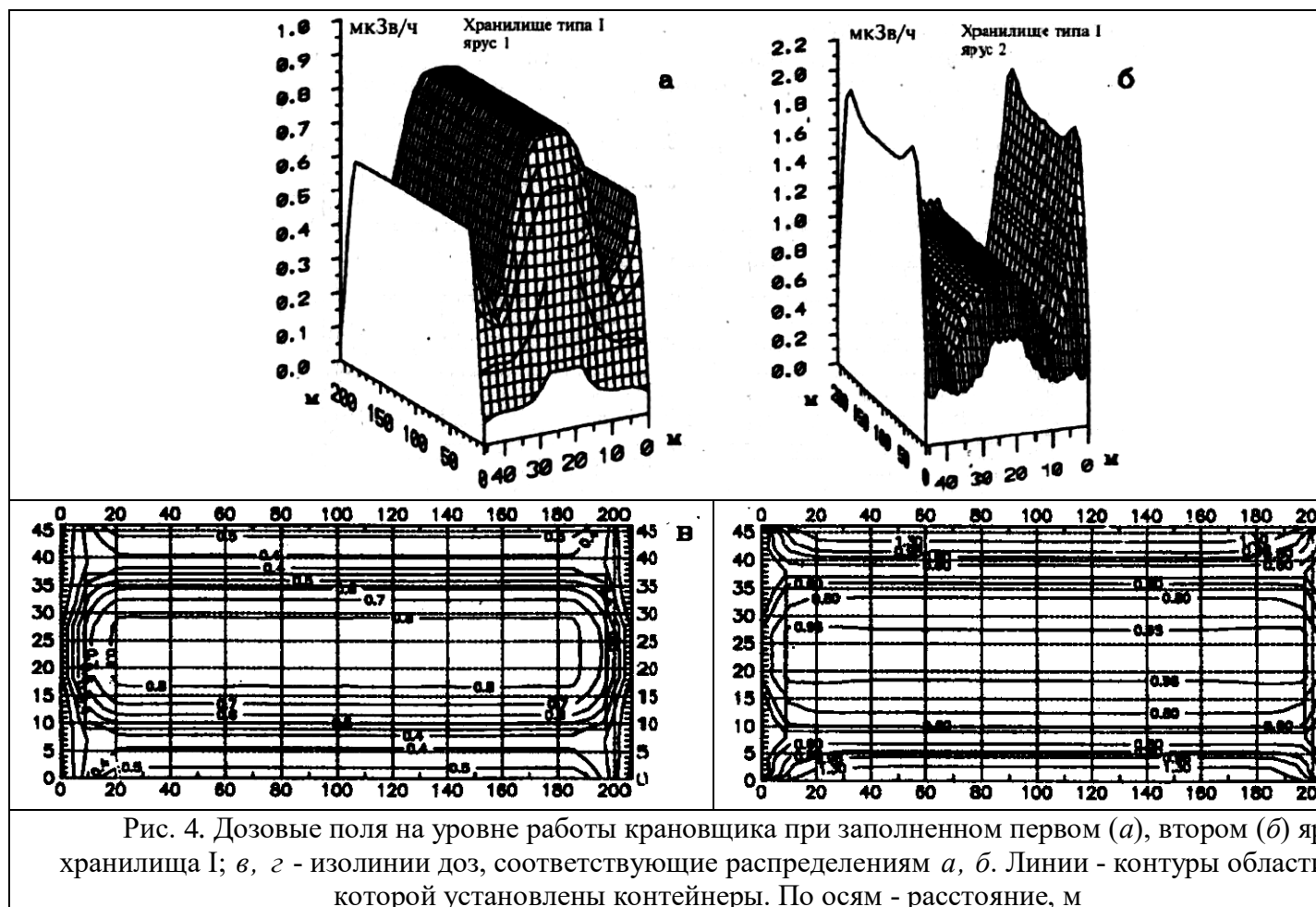
На рис. 3, в приведены результаты расчета дозового поля на уровне работы крановщика на участке отстоя контейнеров. Здесь также обозначены контуры областей расположения 13х4 шт. и 14х4 шт. омоноличенных контейнеров. Максимальная доза вдоль линии перемещения крановщика (точка *K*) составляет приблизительно 0,47 мкЗв/ч, что удовлетворяет требованиям проектной мощности дозы.

Таким образом, потенциально наиболее радиационно опасным участком здания подготовки контейнеров к захоронению является участок укупорки. Обеспечение непревышения основных дозовых пределов облучения персонала на этом участке может достигаться как за счет использования более массивных временных крышек

164

контейнеров РАО, дополнительных ограждений и биологических экранов, так и путем жесткого ограничения времени пребывания персонала на участке и сведение его до минимума за счет использования дистанционных систем управления процессами смены крышек и омоноличивания контейнеров.

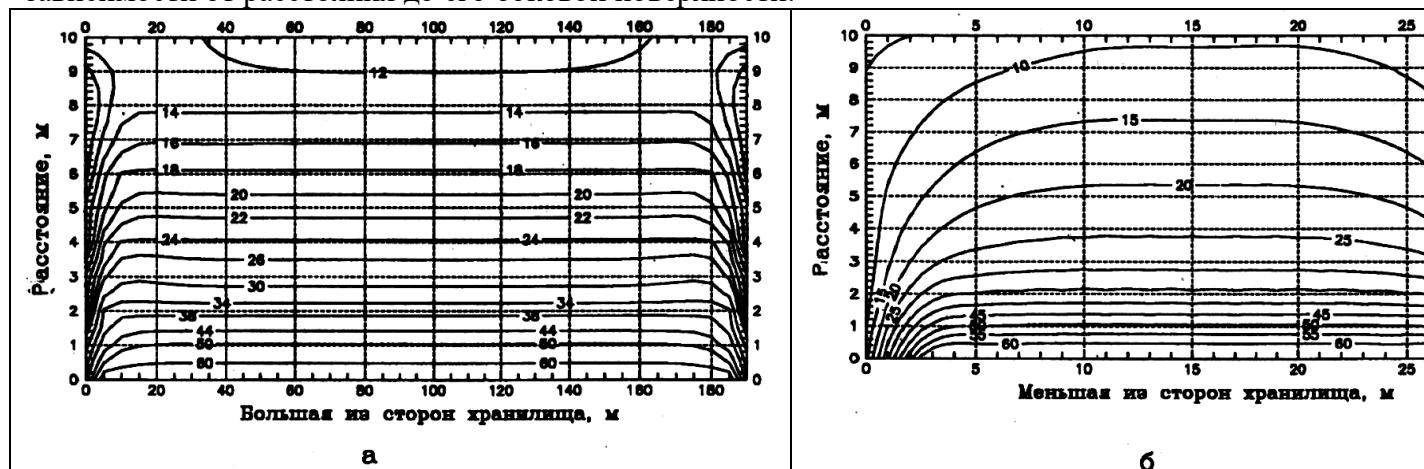
5.3. Хранилище типа I. На рис. 4 представлены результаты расчета дозовых полей на уровне работы крановщика при полном заполнении первого и второго ярусов хранилища I. Характерной особенностью приведенных распределений является то,



165

что при увеличении ярусности хранилища, происходит существенное увеличение мощности дозы по краям расчетной области пространства. Непосредственно же над хранилищем возрастание дозы не столь значительно. Качественно данный эффект объясняется тем, что возрастание ярусности хранилища приводит к увеличению площади его боковой поверхности. Излучение же последней как раз и дает определяющий вклад в мощность дозы на периферии расчетной области. Одновременно с этим, ввиду практически полного взаимного экранирования контейнеров, доза непосредственно над хранилищем определяется только излучением контейнеров, расположенных на верхнем ярусе.

На рис. 5 приведены изолинии дозы на высоте 1 м от основания хранилища в зависимости от расстояния до его боковой поверхности.



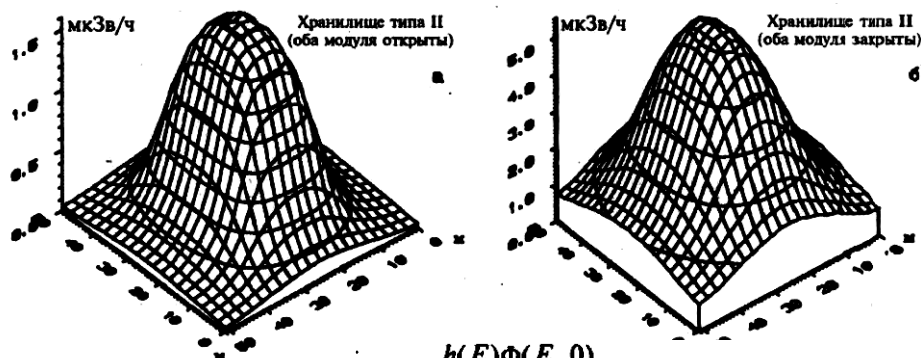
Расчет произведен при условии полного заполнения хранилища, т.е. при максимальной суммарной площади боковых поверхностей установленных контейнеров. Как следует из рисунка, при отсутствии дополнительных средств защиты место постоянного пребывания персонала не должно находиться ближе 8 м от хранилища.

5.4. Хранилище типа II. На рис. 6 представлены результаты расчета дозовых полей на уровне работы крановщика при полной загрузке двух модулей хранилища. Максимальная доза (точка K на рис. 6, в), формируемая открытыми модулями РАО на линии работы крановщика, составляет 700-900 мкЗв/ч, что существенно превосходит нормативные значения проектной мощности дозы. Как следует из рис. 6, б, г, после перекрытия модулей мощность дозы снижается до приемлемого уровня во всей расчетной области пространства, вдоль линии перемещения крановщика не превышает 3,5 мкЗв/ч.

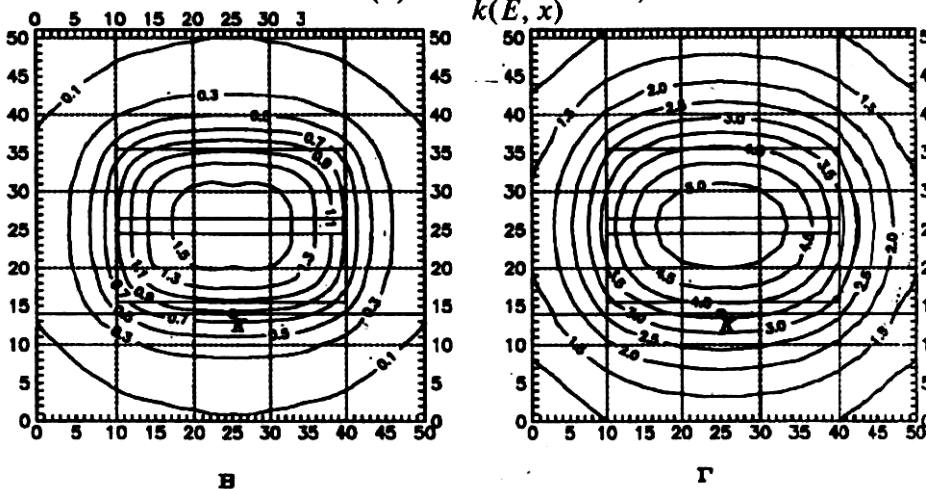
Расчет мощности дозы на внешней стороне боковой стенки модуля показал, что она не превосходит величины 5 мкЗв/ч. Данное обстоятельство с точки зрения дозы внешнего облучения не ограничивает пребывание обслуживающего персонала возле модулей.

5.5. Мощность дозы после обваловки хранилищ. Поскольку увеличение толщины защиты ведет к возрастанию вычислительных затрат и снижению эффективности стандартной схемы метода Монте-Карло, для оценки дозы на поверхности обвалованного хранилища был применен вариант метода коэффициентов ослабления [1, 8].

Рис. 6. Дозовые поля на уровне работы крановщика при открытых (а, в), мЗв/ч, и закрытых (б, г), мкЗв/ч, модулях хранилища II. Линии - контуры модулей и перемещения крановщика. По осям на рис. в, г - расстояние, м



$$dH(x) = \frac{h(E)\Phi(E, 0)}{k(E, x)} dE, \quad (11)$$



167

Он состоит в том, что для расчета дозы на поверхности обвалованного хранилища можно записать в

общем. Пусть $k(E, x)$ - коэффициент ослабления дозы с энергией E в материале толщиной x . Тогда вклад γ -излучения, имеющих энергию E , в мощность дозы на расстоянии x можно записать в

$$H(x) = \int_0^{E_0} \frac{h(E)\Phi(E, 0)}{k(E, x)} dE,$$

где E_0 - максимальная энергия спектра.

Это соотношение и положено в основу расчета мощности дозы на поверхности обвалованных хранилищ.

При проведении расчетов были использованы значения коэффициентов кратности ослабления, протабулированные для разных материалов на сетке значений энергий и толщин [8]. В промежутках между узлами значение кратности ослабления находилось путем двумерной интерполяции.

Спектральное распределение γ -излучения, падающего на внутреннюю стенку контейнера хранилища I и модуля хранилища II, рассчитывались по методу Монте-Карло. Полученные энергетические распределения плотности потока γ -квантов представлены на рис. 7. Толщина защитного материала хранилищ, состоящего из вещества обваловки и стенок контейнеров, принималась как слой бетона эквивалентной толщины:

$$L_{\text{экв}} = D_n + L_0 \frac{\rho_0}{\rho_6}, \quad (13)$$

где D_n - толщина постоянной крышки контейнера (толщина перекрытия модуля для хранилища II); $L_0 = 215$ см - толщина обваловки хранилищ; $\rho_0 = 1,6$ г/см³ и $\rho_6 = 2,3$ г/см³ - плотность обваловки и бетона соответственно. Использование приближения (13) оправдано ввиду близкого элементного состава бетона и вещества обваловки.

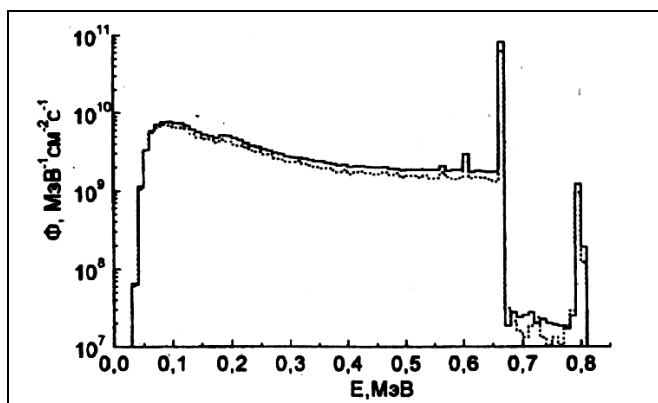


Рис. 7. Энергетические распределения плотности потока γ -излучения на внутренних стенках контейнера (хранилище I) и модуля (хранилище II) с РАО:
точки - модуль; линия - контейнер

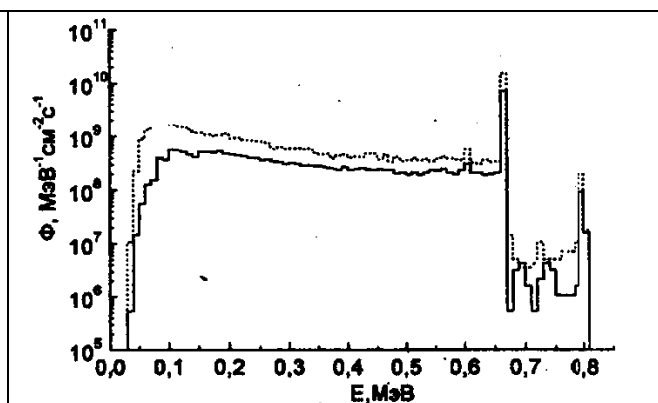


Рис. 8. Энергетическое распределение плотности потока γ -излучения в месте расположения крановщика на хранилище II и участке укупорки контейнеров:
точки - хранилище II, линия - участок укупорки

В соответствии с (12) и (13), для эквивалентных толщин защиты и мощности дозы на поверхности хранилищ I (II) получено: 189 см (194 см) и 46 пЗв/ч (23 пЗв/ч) соответственно. Из приведенных цифр следует, что значение мощность дозы на поверхности хранилищ РАО обоих типов в штатном режиме эксплуатации будет существенно меньше уровня естественного радиоактивного фона.

5.6. Расчет защиты. В данном пункте приведены результаты расчета биологической защиты на участке укупорки в здании подготовки контейнеров к захоронению и на хранилище II. Как следует из приведенных выше результатов, именно эти участки проектируемого производства будут представлять собой наибольшую радиационную опасность с точки зрения внешнего облучения. В обоих случаях рассчитывалась защита рабочих мест крановщиков, выполняющих погрузочно-разгрузочные работы в течение всего рабочего времени, и по этой причине находящихся в наиболее неблагоприятных по сравнению с другим обслуживающим персоналом условиях.

Методика расчета защиты базируется на выражении (12), которое можно рассматривать как уравнение для определения толщины защитного материала L , обеспечивающей снижение, мощности дозы до заданной величины $H(L)$. В расчетах принято: $H(L) = 14$ мкЗв/ч.

На рис. 8 представлены спектральные распределения плотности потока $\Phi(E, 0)$ γ -излучения в месте расположения крановщиков на участке укупорки и хранилище II. Они

получены путем статистического моделирования и представляют собой усредненные вдоль линии перемещения крановщиков величины.

Численное решение уравнения (12) для защиты из бетона, железа и свинца с использованием приведенных на рис. 8 спектральных распределений плотности потока γ -излучения дает следующие толщины: 27,5; 7,0; 2,2 см для участка укупорки и 38,0; 10,0; 3,5 см для хранилища II. Полученные значения толщины защиты, однако, несколько завышены (на половину толщины слоя половинного ослабления), поскольку использованные в расчете коэффициенты кратности ослабления относятся к случаю бесконечной среды. Толщина слоя половинного ослабления для наиболее интенсивной линии спектра 661,6 кэВ составляет ≈ 5 ; 1,5 и 0,6 см для бетона, железа и свинца соответственно.

169

1. Гусев Н.Г., Климанов В.А., Машикович В.Т., Суворов А.П. Защита от ионизирующих излучений. - Т. 1. - Физические основы защиты от излучений. - М.: Энергоиздат, 1989. 512 с.
5. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. - М.: Наука, 1973. - 311 с.
6. Хисамутдинов А. И., Стариков В.Н., Морозов А.А. Алгоритмы Монте-Карло в ядерной геофизике. - М.: Наука, 1985. - 157 с.
7. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. - Киев: Наук. думка, 1973. 416с
8. Михайлов Г.А. Оптимизация весовых методов Монте-Карло. - М.: Наука, 1987. - 240 с.
9. Стародубцев С.В., Романов А.М. Прохождение заряженных частиц через вещество. - Ташкент: Изд. АН Узб.ССР, 1962. - 228 с.
10. Добрынин Ю.А. О моделировании процесса аннигиляции позитронов на лету. - М., 1987. - 10 с. (Препр. / АН СССР; ИАЭ-4526/2).
11. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. - М.: Энергоиздат, 1991. - 352 с.

Научный центр «Институт ядерных исследований» Национальной академии наук Украины
Открытое акционерное общество «Киевский институт энергопроект»
Поступила 3.06.98

170

Ю. В. ВЕРЮЖСЬКИЙ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТУ «УКРИТТЯ» ЯК ПРЕДСТАВНИКА КЛАСУ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

Показана ефективність розповсюдження на дослідження об'єкту «Укриття» (ОУ) методології вирішення проблем екстремальних об'єктів, що побудована на міжгалузевому рівні. ОУ з функціонально пов'язаними компонентами досліджується як система багатофакторного аналізу ядерної, радіаційної, екологічної та загальнотехнічної безпеки в умовах експлуатації та перетворень. Провідний елемент досліджень - прогнозування поведінки деградуючої конструктивної структури ОУ при екстремальних впливах. Розвивається універсальний апарат детерміністично-імовірнісного чисельного моделювання, оцінок ризику, експериментальних та проектно-вишукувальних робіт. Індивідуалізованим засобом врахування особливостей ОУ є комплексна методика визначення стану системи (у першу чергу - у важкодоступних зонах) на основі послідовного аналізу запроектованої аварії реактору, руйнації 4-го енергоблоку та формування ОУ.

YU. V. VERYUZSKY ANALYSIS OF THE «UKRITIYE» IS THE REPRESENTATIVE OF THE CLASS OF EXTREME OBJECTS

An efficiency of applying a methodology of extreme objects' problems solution built upon an interdisciplinary base to research of the «Ukritiye» encasement is demonstrated. The encasement with connected components is considered to be a subject to multi-factor analysis of nuclear, radiation, environmental and common safety in the course of current exploitation and transformations. The key point of the research is a prognosis of behaviour of the «Ukritiye» structure being degraded under extremely combined influences. A vastpurposed technique is developed for deterministic and probabilistic numerical modeling, risk assessment, experimental and design works. Individual tool for considering peculiarities of the «Ukritiye» is a complex technique of determining the system's state (in scarcely available areas) based upon the sequential analysis of the reactor core accident, the 4th Unit's destruction and the «Ukritiye» erection.

Б. П. ІВАЩЕНКО ТИСК У РЕАКТОРНОМУ ПРОСТОРІ ТА РУХ КРИШКИ РЕАКТОРА ПІД ЧАС АВАРІЇ 1986 Р.

Аналізуються процеси, які мали місце на початку аварії 1986 р. Головна увага приділяється динаміці зміни тиску в реакторному просторі з урахуванням надходження теплоносія в активну зону крізь обірвані технологічні канали та одночасному виході пароповітряної суміші крізь штатну систему паросбросу та утворені

нещільності захисної оболонки. На цій основі вивчається рух кришки реактора, при цьому враховується взаємодія кришки, що підіймалася, з розвантажувально-завантажувальною машиною. Знайдений тиск газу в реакторному просторі, і на цій основі розрахований тиск на стіни та перекриття приміщень барабан-сепараторів та центрального залу, що мали місце після викиду кришки та виходу пароповітряної суміші з шахти реактора в сусідні приміщення.

B. P. IVASCHENKO

PRESSURE IN REACTOR VOLUME AND MOVEMENT OF REACTOR'S COVER DURING 1986 YEAR ACCIDENT

In the paper processes are analysed, which took place at the beginning stage of the 1986 year accident. The main attention is given to changing of pressure in reactor volume with consideration

171

of entering of heat transmitter in active zone through destroyed technological channels and simultaneously exiting steam through permanent steam-exiting system and through creating clearances in protector shell. On this base the movement of the reactor's cover is studied, and the interaction between going up reactor's cover and unload-load machine is considered.

The pressure of gas in reactor volume is determined and on this base the pressure on walls and covers of central hall and housings of separators is calculated, which took place after steam going up from reactor volume into neighboring housings.

Ю. І. РУБЕЖАНСЬКИЙ

ТОПОГРАФІЯ ФРАГМЕНТІВ АКТИВНОЇ ЗОНИ РЕАКТОРА, ВИКИНУТИХ ВНАСЛІДОК АВАРІЇ НА ЧОРНОБІЛЬСЬКІЙ АЕС

Розроблена методика визначення топографії уламків активної зони реактора, викинутих вибухом внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС. Внаслідок серії численних дослідів побудовані області руйнування і викиду активної зони реактора. Досліджено рух уламків активної зони в полі сил тяжіння. Побудована топографія викинутих фрагментів для випадку вибуху активної зони в штатному положенні і її вибуху над настилом реакторного відділення.

YU. I. RUBEZHANSKY

TOPOGRAPHY OF THE REACTOR ACTIVE CORE FRAGMENTS EJECTED BY THE ACCIDENT AT CH NPP 4th UNIT

The general procedure for the determination of topography of the reactor active core wreckage ejected by explosion as a result of the Chernobyl NPP accident has been developed. The regions of the failure and the reactor active core ejection have been constructed by the numerical experiment series. The active core wreckage motion in the field of gravity has been explored. The ejected fragments topography for the case of the active core explosion in the standard position and over the reactor section plating has been constructed.

Ю. В. ВЕРЮЖСЬКИЙ, П. А. СИНЬОВ, С. В. КОШ КІН, В. В. САРКІСОВ

МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ РБМК 1000 НА СТАДІЇ ПОЗАПРОЕКТНОЇ АВАРІЇ

Демонструється застосування розроблених засобів чисельного моделювання руйнування конструкцій реактора 4-го енергоблоку ЧАЕС під час позапроектної аварії, з використанням достовірних фактів щодо проміжних та остаточних станів конструкцій як основи для верифікації отриманих результатів.

YU. V. VERYUZSKY, P. A. SINYOV, S. V. COSHKIN, V. V. SARKISOV

SIMULATION OF CONSTRUCTION OF RBMK 1000 DURING THE STAGE OF THE CORE ACCIDENT

The paper exhibits the usage of developed means for numerical modeling of destruction process of the constructions of the Chernobyl NPP Unit 4 Reactor during the core accident; reliable facts related to intermediate and final states of the constructions are used as a base to verify the results obtained.

172

М. Т. ІЩЕНКО, О. В. ШИМАНОВСЬКИЙ, Н. О. СІРТА, М. В. ГЕРАСИМОВА

ЧИСЕЛЬНІ МОДЕЛІ 4-ГО ЕНЕРГОБЛОКУ ЧАЕС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ЙОГО КОНСТРУКЦІЙ В ЕКСПЛУАТАЦІЙНОМУ, АВАРІЙНОМУ ТА ПІСЛЯАВАРІЙНОМУ СТАНІ

З використанням архівної документації побудована конструктивна схема експлуатаційного стану 4-го енергоблоку ЧАЕС. Розроблені різноманітні варіанти просторових скінчено-елементних моделей, які дозволяють з різною мірою деталізації реалізувати конструктивну схему 4-го енергоблоку за допомогою обчислювальних комплексів COSMOS, SCAD та ROBOT. Виконані розрахунки характерних напружено-деформованих станів 4-го енергоблоку при різноманітних сполученнях навантажень та впливів для оцінки ефективності розроблених варіантів скінчено-елементних моделей. На основі аналізу отриманих результатів виконано вибір розрахункової моделі 4-го енергоблоку ЧАЕС для подальших чисельних досліджень механічної поведінки його конструкцій, в тому числі в процесі запроектої аварії та при виконанні локалізації та ліквідації її наслідків.

N. G. ISHCHENKO, A. V. SHIMANOVSKY, N. A. SIR OTA, M. V. GERASIMOVA

COMPUTATIONAL MODELS OF THE 4 BLOCK OF CHERNOBYL NPP TO BE USED IN RESEARCH OF CONSTRUCTIONS BEHAVIOUR IN OPERATIONAL, EMERGENCY AND WRECKED STATES

A structural scheme of operational state of the CNPP 4 block is built with usage of archival documents. Various versions of spatial finite element models are developed; they allow the realization of the 4 block structural scheme with various extent of detailing, using application software packages COSMOS, SCAD and ROBOT. Analyses of peculiar stress-deformed states of the 4 block under various combinations of loads and influences are performed in order to estimate efficiency of the FEM models versions developed. Based on the result consideration a computational model of the 4 block is chosen for further numerical analysis of its constructions' mechanical behaviour, including that in the course of the core accident and in the course of localization and mitigation of the accident consequences.

Н. Г. ІЩЕНКО, К. І. АНКЯНЕЦЬ, С. Ю. ФІАЛКО, М. Н. СКУРАТОВСЬКИЙ, Н. Ю. АНКЯНЕЦЬ
МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ 4-
ГО БЛОКУ ЧАЕС ПРИ ЗАПРОЕКТНІЙ АВАРІЇ

Робота присвячена моделюванню поведінки будівельних конструкцій четвертого енергоблоку при вибуховому впливі в початковій стадії запроектованої аварії. Розглядалась одна з можливих версій аварії. Значення аварійних впливів встановлені з розрахунку задачі аеродинаміки.

Чисельне дослідження поведінки конструкцій 4-го блоку ігри впливі вибуху виконано на засадах МКЕ. Для аналізу динамічної реакції системи на задане навантаження застосовувалось чисельне інтегрування рівнянь руху по методу Ньюмарка. Розроблена методика визначення критеріїв руйнування для залізобетонних конструкцій та виконано аналіз результатів розрахунку.

173

N. G. ISCHENKO, K. I. ANKIANETS, S. Y. FIALKO, M. N. SKURA TOVSKY, N. Y. ANKIANETS.
MODELING OF STRESS-DEFORMED STATE OF THE CHERNOBYL NPP UNIT 4 BUILDING
CONSTRUCTIONS IN THE COURSE OF THE CORE ACCIDENT.

The paper deals with modeling of the Unit 4 building constructions behaviour under explosion influence during the initial phase of the core accident. One of possible versions of the accident was under consideration. Values of accident influences were obtained from aerodynamic analysis. Numerical research of the Unit 4 constructions behaviour under explosion was performed by finite elements. To analyse the system's dynamic response to the given loading, Newmark numerical integration of the motion equations was applied. A technique to determine ferroconcrete constructions destruction criteria was developed, consideration of the analysis' results was performed.

Ю. В. ВЕРЮЖСЬКИЙ

МЕТОДИ АНАЛІЗУ БЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТУ «УКРИТТЯ»

Аналіз методу дослідження безпеки об'єкту «Укриття» (ОУ) показує, що існуюча нормативно-технічна база не дозволяє отримати вірогідних кількісних характеристик стану ОУ при реалізації регламентованих вихідних подій. В результаті помилкових припущень занижено рівень консервативної оцінки ризиків, що визначається у офіційних документах. Пропонується використати системний підхід для досліджень та оцінки негативних наслідків процесів руйнації захисних бар'єрів ОУ. Рішення будується на основі синтезу імовірнісних та детерміністичних методів при використанні натурних обстежень та експертних оцінок для верифікації вихідних та результуючих даних. Запропонований напрям реалізовано на усіх етапах методики оцінок ризиків. Приведені характерні приклади аналізу наслідків вихідних подій падіння літаків та вибухів зовні ОУ.

YU. V. VERYUZSKY

THE METHODS OF ANALYSIS OF THE SAFETY OF THE «UKRITIYE»

Analysis of methods of the safety assessment of the «Ukritye» encasement demonstrates that the existing standart codes and technical support are insufficient to obtain true quantitative characteristics of the encasement for the case of initial event's realization. Mistaken assumptions have resulted in decreasing the level of risk assessment conservatism adopted in official requirements. It is proposed that system analysis approach be used to research and assess negative consequences of the «Ukritye» protection barriers' destruction. A solution is obtained from synthesis of probabilistic and deterministic methods as well as from usage of tool inspections and expert estimates to verify source data and results. The direction being proposed is implemented for all phases of risk assessment. Characteristic examples are presented for the analysis of consequences of the initial events of an aircraft falling upon the «Ukritye» and external explosions.

174

В. П. БРОДОВИЙ, Б. П. ІВАЩЕНКО

ПОБУДОВА ТА ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ РАДІАЦІЙНОЇ
НЕБЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»

Досліджуються характерні особливості методики, застосовної при аналізі безпеки (оцінки ризику) об'єкта «Укриття», та особливості самого об'єкта, що впливають на побудову такої методики. Формулюються використовувані показники (функції) ризику, обговорюється ефективність вибору тих чи інших з них. Математично характеризується врахування невизначеності параметрів об'єкта «Укриття» при моделюванні аварійних процесів, вплив цієї невизначеності на значення функцій ризику. Наводяться деякі кількісні оцінки показників ризику об'єкта «Укриття» з висновками щодо їх якості.

V. L. MODOVY, B. P. IVASHCHENKO

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A PROCEDURE FOR ASSESSING RADIATIONAL
DANGER INDICATORS OF THE «UKRYTIYE» ENCASEMENT

Characteristic peculiarities of a procedure applied during safety analysis (risk assessment) of the «Ukrytiy*» encasement are discussed, as well as those of the encasement itself which take effect on developing such procedure. Indicators (functions) of risk to be used are formulated, the efficiency of their choice is discussed. A mathematical aspect of considering the parameters' uncertainty within the «Shelter» when modeling accident processes is characterized, as well as this uncertainty's influence upon values of risk functions. Some quantitative estimations of risk indicators are presented along with conclusions about their quality.

О. В. ШИМАНОВСЬКИЙ, Н. О. СИРОТА, М. В. ГЕРАСИМОВА
ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПОРНИХ КОНСТРУКЦІЙ БАЛОК Б1, Б2 ПОКРИТТЯ ОБ'ЄКТУ
«УКРИТТЯ» В ОСЯХ 50-Ж.

Виконано дослідження напружено-деформованого стану опорних конструкцій балок Б1, Б2 покриття об'єкту «Укриття», які знаходяться на перетині вісей 50-Ж. Конструктивна схема об'єкту з урахуванням руйнувань, побудована на базі даних архівних досліджень та натурних обстежень доступних конструкцій. Виявлено, що конструктивна схема повинна враховувати не тільки безпосередньо підпорні конструкції балок Б1 та Б2, але й звал уламків конструкцій та сипучих матеріалів, барабан-сепаратори та нижчерозташовані стіни та перекриття блоку «Б». З урахуванням конструктивної схеми реалізована скінчено-елементна модель вузла оперття балок. Виконані розрахунки напружено-деформованих станів при різноманітних сполученнях навантажень та впливів. На базі аналізу отриманих результатів виявлені найбільш небезпечні сполучення навантажень та впливів, та найбільш навантажені зони споруд.

A. V. SHIMANOVSKY, N. A. SIROTA, M. V. GERASIMOVA
NUMERICAL ANALYSIS OF SUPPORT CONSTRUCTIONS OF THE BEAMS B1, B2 OF THE
«UKRITIYE» ENCASEMENT ROOF IN THE AXES 50-Ж.

Results of numerical analysis of stress-deformed state of supporting constructions of the beams B1, B2 of the «Ukrytiye» encasement roof are presented, the beams being located on

175

the axes 50-Ж intersection. The structural scheme of the encasement with consideration of present destructions has been restored based upon data of archival research and visual inspection of available constructions. It is shown that the structural scheme must include not only direct supporting of the beams B1 and B2 but also a pile of fallen constructions and friable materials, steam separators, walls and bars of the block B lying lower. A finite element model of the beams support junction is implemented with consideration of the structural scheme. Computations are performed for various principal and peculiar combinations of loads. Basing on consideration of results obtained, most dangerous loads and influences combinations are discovered as well as structure's zones loaded most strongly.

Л. В. АНДРОЩУК, Б. І. ІВАЩЕНКО, С. К. НІКІТІН
АНАЛІЗ УТВОРЕННЯ ТА ПЕРЕМІЩЕННЯ ПИЛОВОЇ ХМАРИ У ВИПАДКУ РУЙНУВАННЯ
ОБ'ЄКТУ «УКРИТТЯ»

У результаті проведених досліджень побудовано математичну модель процесу утворення та переміщення пилової хмари в об'єкті «Укриття» на випадок падіння його даху. Запропоновано методику і розроблено пакет прикладних програм, що дозволяють досліджувати процес пилоутворення при різноманітних сценаріях руйнування об'єкту «Укриття». Результати чисельного дослідження можуть бути використані при розробці системи пилопридушення та інших засобів по ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС.

L. V. ANDROSHCHUK, B. P. IVASHCHENKO, S. K. NIKITIN
ANALYSIS OF PROCESS OF FORMATION AND MOVEMENT OF DUST CLOUD IN CASE OF
DESTRUCTION OF THE «SHELTER» ENCASEMENT

The mathematical model of formation and movement of dust cloud in the «Shelter» encasement when its roof falls has been developed. The proposed method and computer program allow to research process of formation of cloud at different scenarios of the «Shelter» destruction. The numeral research results can be used for developing of dust suppression system and other measures for elimination of consequences of Chernobyl accident.

В. А. ПРУСОВ, О. В. КОПІЙКА, Р. Ю. ГРИМОВ
ГІДРОДИНАМІЧНА МЕЗОМАСШТАБНА МОДЕЛЬ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ДОМІШОК ВІД
МИТТЄВИХ ТА СТАЦІОНАРНИХ ТОЧКОВИХ ДЖЕРЕЛ ВИКИДУ

Пропонується комплексна оперативна модель чисельного прогнозу на ПЕОМ полів швидкості вітру, температури, тиску, хмарності, опадів, а також формування та переносу полів забруднення від миттєвих та постійно діючих точкових джерел викидів домішок в атмосферу за реальних погодних умов в області з довільними лінійними розмірами. Модель дозволяє розв'язувати задачі прогнозу стану атмосфери, що зазнала техногенного впливу при аварійних та штатних режимах роботи промислових підприємств. Задача знайде застосування в прогнозах трансграничного переносу забруднень в атмосферу.

176

V. A. PRUSOV, O. V. KOPIYKA AND R. YU. GRIMOV
HYDRODYNAMIC MESOSCALE MODEL OF ADMIXTURE DISTRIBUTION FROM
INSTANTANEOUS AND STATIONARY SOURCES OF POINT EJECTION

A complex operative model of PS numerical prognosis on the speed fields of wind, temperature, pressure, nebulosity, precipitation and on the formation and transfer of the pollution fields from instantaneous and permanent sources of admixture ejections into the atmosphere under real weather conditions in the region of arbitrary linear dimensions. The model allows to solve the problem of atmospheric status prognosis due to a techogenic impact of industrial enterprise work in regular or accident regimes. The problem solution will find its application in transborder transfers prognoses of pollutions in the atmosphere.

Л. В. АНДРОЩУК, Б. П. ІВАЩЕЯКО, С. К. ЕІКІТІН, В. М. СВЕСШІКОВ
ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ АВАРІЙНОЇ СИСТЕМИ ПИЛОПРИГНІЧЕННЯ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»

В роботі оцінюється ефективність одного з запропонованих варіантів аварійної системи пилопригнічення об'єкту «Укриття». Процес взаємодії пилових часток з каплями пилопригнічуючої рідини аналізується на основі ймовірностного підходу. Рух повітряних мас та завислих часток пилу та краплин рідини досліджується за допомогою кінцеворізницевого чисельного методу аеродинаміки за явною різницевою схемою на основі методики Мак-Кормака. Наведені результати розрахунків ефективності системи пилопригнічення для двох значень швидкості вітру - 5 та 35 м/с.

L. V. ANDROSHCHUK, B. P. IVASKCHENKO, S. K. NIKITIN, V. N. SVESHNIKOV
THE APPRAISE OF EFFECTIVENESS EMERGENCY FIGHT-DUST SYSTEM OF
OBJECT «SHELTER»

In paper is evaluated effectiveness of one alternative emergency fight-dust system of object «Shelter». Investigation of interaction between particles of dust and drops of fight-dust fluid is based on probability methods. Movement of air and particles of dust and drops or liquid is investigated by numerical finite-difference method, which is based on method Mc'Cormac. The results of calculations of effectiveness fight-dust system are presented for two values of speed of air - 5 m/s and 35 m/s.

Ю. В. ВЕРЮЖСЬКИЙ, П. О. СИНЬОВ, І. В. АІТЕКСЄСВ, В. Л. БРОДОВИЙ, Г. В. ГАВРИЛОВ
ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС ТА БАЗА ДАНИХ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»

У статті розглядаються цілі, задачі та характеристики програмно-технічного комплексу, розробленого для дослідження термомеханічних процесів у об'єкті «Укриття», моделювання Чорнобильської аварії 1986 р. та потенційно можливих аварій, аналізу

177

надійності та безпеки об'єкта. Описані структура та призначення баз даних для збереження та систематизації інформації, яка відноситься до об'єкту «Укриття». Викладені перспективи розвитку програмно-технічного комплексу та відповідних систем управління базами даних.

YU. V. VERYUZSKY, P. A. SINYOV, I. V. ALEXEEV, V. L. BRODOVY, G. V. GAVRILOV
AN APPLICATION PROGRAM PACKAGE AND A DATA BASE FOR RESEARCHES RELATED TO
«UKRITIYE» ENCASEMENT

The paper deals with purposes and features of an application program package developed for researching thermal and mechanical phenomena within «Ukrtiye» encasement, Chernobyl 1986 accident and potentially possible ones modeling, reliability and safety analysis of the encasement. The structure and purpose of data bases for keeping and classifying information related to the «Ukrtiye» encasement are described. Perspectives of the package and the data bases control systems development are reviewed.

Ю. В. ВЕРЮЖСЬКИЙ, В. М. БУРЛАКОВ, В. В. ГАЖИЄНКО, І. І. ЗАРУДНЄВ, Г. Є. СОКОЛОВ
ПРИНЦИП ДІЇ, ІНФОРМАЦІЙНІ МОЖЛИВОСТІ ТА СТАН РОЗРОБОК РАДІОЛОКАЦІЙНИХ
СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ В ІНТЕРЕСАХ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТА
«УКРИТТЯ» І ЧОРНОБІЛЬСЬКОЇ ЗОНИ

Стаття присвячена пошуковим роботам по створенню автоматичних систем контролю на основі радіолокаційної техніки, що направлені на забезпечення безпеки об'єкта «Укриття» і Чорнобильської зони. Описані результати трьох систем. Перша - автоматична радіогеодезична система вимірювання переміщення балок покриття ОУ. Друга - радіотехнічна система дистанційного виявлення виникаючих у зоні пожеж, що працює по принципу багатоканальної тепlopеленгації. Третя - комбінована система дистанційного зондування підповерхневих середовищ, що призначена для виявлення паливовміщуючих мас.

YU. V. VERYUZSKY, V. M. BURLAKOV, V. V. GAZHENKO, I. I. ZARUDNEV, G. E. SOKOLOV
THE PRINCIPLE OF WORK, THE INFORMATIVE POSSIBILITY AND THE STATE OF
ELABORATION OF RADAR SYSTEMS DISTANCE CONTROL FOR INTEREST OF SAFETY UKRITIYE
ENCASEMENT AND CHERNOBYL ZONE.

The elaboration of automatic control systems, based on radar technology for interest safety Ukrtiye encasement and Chernobyl zone are described in this article. Three systems are described. First, this is automatic radiogeodesy system for measuring of shift of roof beams of Ukrtiye encasement. Second, this is radiotechnical system for distance discovery of fires in Chernobyl zone, based on principle of manycannal heat direction finder. Third, this is combine system of distance sounding of underground environment for discovery of radioactive materials.

178

М. Н. СКУРАТОВСЬКИЙ, М. Г. ІЩЕНКО, В. Л. БРОДОВИЙ

**ДИНАМІКА ЗНОСУ ТА РЕМОНТІВ ЖИТЛОВОГО ФОНДУ м. ПРИП'ЯТЬ
З УРАХУВАННЯМ ПЕРСПЕКТИВ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ.**

Виходячи з припущення про можливе використання житлового фонду м. Прип'ять, розглядаються задачі оцінки та прогнозування його зносу та відновлення. Отримано кількісні залежності між характеристиками зносу та відновлення однотипних об'єктів. Підраховано коефіцієнт готовності житлового фонду м. Прип'ять при врахуванні неоднорідності його амортизації та різних швидкостей старіння.

**M. N. SKURATOVSKY, K. G. ISHCENKO, V. L. BRODOVY
DYNAMICS OF WEARING-OUT AND REPAIRS OF RESIDENTIAL RESOURCES IN PRIPYAT TOWN
WITH CONSIDERATION OF PERSPECTIVES OF THEIR USAGE**

Problems of assessment and forecast of wearout and reparation of Pripyat town residential resources are under consideration, with taking an assumption about its potential use. Quantitative dependencies between characteristics of wearout and reparation of objects of the same type are obtained. A ratio of preparedness of Pripyat town residential resources is calculated with consideration of its amortization's heterogeneity and various rates of aging.

**В. Я ПІНЧУК, С. О. ДОВГІЙ, В. М. КАЛІНІН, О. В. КОПІЙКА
ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНА СИСТЕМА «ІНФОРМ-ЧОРНОБІЛЬ»**

Дано концептуальний опис створюваної відомчої системи управління, що призначена для підтримки прийняття рішень на базі автоматизації інформаційних процесів в галузі всього комплексу проблем по ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС і захисту населення від їх впливу. Наведено основні проектні рішення по створенню системи, а також новий підхід проектування великих інформаційних систем.

**V. Y. PINCHUK, S. A. DOVHIY, V. M. KALININ, O. V. KOPEYKA
INFORM - CHERNOBYL ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEM**

A conceptual description of the departmental management system being created designated to support in arriving at a decision on the basis of the automatization of information processes in the field of all sets of problems on liquidating the consequences of the Chernobyl NPP accident and the protection of population from their impact is given. The main design solutions on creating the system are demonstrated. A new approach towards designing large information system is represented.

**В. Я. ПІНЧУК, А. М. КАЛІНІН, С. А. ЄЖОВ
АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ТА ПИТАННЯ ПОБУДОВИ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ
ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В СФЕРІ УПРАВЛІННЯ**

Аналізується історія розвитку систем підтримки прийняття рішень (СППР), розглядаються питання створення СППР, які застосовуються до управлінської сфери. Відзначаються особистості побудови систем подібною класу, а також пропонується підхід до утворення банку даних дія СППР.

179

**V. Y. PINCHUK, V. M. MLINIJS, S. A. YEZHOU
ANALYSIS OF DEVELOPMENT PROSPECTS AND PROBLEMS OF DECISION SUPPORT SYSTEMS
DEVELOPMENT IN THE SPHERE OF MANAGEMENT**

In this paper the history of decision support systems (DSS) development is analysed, problems of creation of DSS applicable in the field of management are under consideration. Peculiarities of developments in this class of the systems are indicated; also, an approach to organization of the DSS data base is proposed

**В. В. ГРИШИН, А. М. БЕРЛІЗОВ, І. М. КОВАЛЬ, О. А. ТРЕТЬЯКОВ
ОЦІНКА ДОЗОВИХ ПОЛІВ ПРИ ПОВОДЖЕННІ З РАДІОАКТИВНИМИ ВІДХОДАМИ НА ПЕРШІЙ
ЧЕРЗІ ВИРОБНИЦТВ КОМПЛЕКСУ "ВЕКТОР"**

Представлено методику статистичного моделювання та результати виконаних на її основі розрахунків дозових полів при поводженні з радіоактивними відходами на першій черзі виробництва комплексу "Вектор".

**V. V. TRISHIN, A. N. BERLIZOV, G. N. KOVAL, A. A. TRETIYAKOV
DOSE FIELD EVALUATIONS IN RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT ON THE FIRST STAGE OF
"VECTOR" PRODUCTION COMPLEX**

Statistical modelling technique as well as the results of its application to the dose field calculations during radioactive waste management on the first stage of "Vector" production complex are presented.

180

РЕЦЕНЗИЯ НА СБОРНИК

**«ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ: ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КУЛЬТУРЫ
БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ»**

ПОД РЕДАКЦИЕЙ Г. Е. ЖУРАВЛЕВА.
МОСКВА: ИЗД. ЦЭМИ РАН, 1997, 274 с.

Термин «культура безопасности» начал активно применяться в исследованиях, посвященных безопасности современных высокотехнологичных производств, с 1986 года, сразу после Чернобыльской катастрофы, когда стало очевидным, что катастрофы глобального масштаба определяются комплексом причин, охватывающих все этапы жизненного цикла социотехнической системы: от проектирования до ее ликвидации.

Название сборника оправдывается подбором статей: в процессе последовательного чтения постепенно осуществляется переход от методологии к практическим аспектам повышения культуры безопасности на электростанциях.

Нельзя не согласиться с авторами статей, что одним из «ключевых» моментов проблематики культуры безопасности является понятие ментальности на всех уровнях жизненного цикла социотехнических систем. Интерес представляют результаты исследования ментальности различных групп персонала, полученные Г. Е. Журавлевым. В частности, выявленная зависимость между отношением к руководству и требованиями к безопасности может учитываться при разработке программ повышения культуры безопасности.

Наиболее интересна статья, представленная коллективом авторов об эргономическом обеспечении безопасной деятельности на «Укрытии» разрушенного 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС. Обследование «Укрытия», проведенное в рамках разработанной оригинальной методологии, не только выявило недостатки в организации деятельности персонала, но и позволило наметить конкретные мероприятия по повышению культуры безопасности. Эти результаты особенно актуальны по той причине, что в настоящее время мировым сообществом принято решение выделить значительные средства (около 750 млн долл.) на преобразование «Укрытия» в экологически безопасную систему. К сожалению, в разработанных проектах практически не предусмотрены работы, связанные с человеческими факторами безопасности, и это должно стать предметом дальнейших исследований.

Принципиально новой представляется тема информационной безопасности атомной энергетики, обсуждаемая в статье В. Е. Лепского. Хотелось бы пожелать автору продолжить разработку этой темы.

Несомненным достоинством сборника является участие зарубежных авторов. Работа Н. Мешкати интересна прежде всего тем, что в ней на основе прикладных исследований показано влияние национальной культуры на безопасность деятельности персонала в разных отраслях.

Учитывая глобальный характер проблем, связанных с использованием атомной энергии, и недостаточную проработку психологических аспектов этой проблемы, хотелось бы поддержать стремление авторов представить материалы сборника на двух языках: русском и английском. К сожалению, этот замысел не был реализован в полном объеме.

181

К числу упущений составителя можно отнести отсутствие материалов по психологическим аспектам экологической безопасности в атомной энергетике. Можно надеяться, что этот недостаток будет восполнен в ходе последующей работы над темой.

Сборник привлечет внимание широкого круга специалистов различного профиля

Генеральный директор ПО «ЧАЭС»
Руководитель группы НТИ «ОУ» канд. техн. наук

С. К. Парашин
В. Я. Сенаторов

182

МІНІСТЕРСТВО УКРАЇНИ З ПИТАНЬ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТА У
СПРАВАХ ЗАХИСТУ НАСЕЛЕННЯ ВІД НАСЛІДКІВ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ КАТАСТРОФИ
АДМІНІСТРАЦІЯ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ І ЗОНИ БЕЗУМОВНОГО
(ОБОВ'ЯЗКОВОГО) ВІДСЕЛЕННЯ

ПРОБЛЕМИ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ

Науково-технічний збірник Засновано у 1994 р.

Випуск 6

Коректори Л. Л. Ващенко, С.В.Пилипенко

Підготовка оригінал-макету та тиражування здійснено Київською філією
"Міжнародного інституту математичної фізики, астрофізики та ядерних досліджень ім.
Вальтера Тірринга"

Р.с. № 20449601 від 05.03.96

Підп. до друку 04.03.98. Формат 70x108/16. Папір оф. Офс. друк. Гарн. Тип Таймс.

Ум.-друк. арк. 21,5. Обл.-вид. арк. 20,59. Тираж 1000 прим. Зам. № 3499

