

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.

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

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));

промоделировать 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 []; 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 контролируемых 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 назначении 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 (возможная 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 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 запрельные 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 Междун. 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: НИИ «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 УкрНИИИТИ 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. *Гольшее А. Б., Бачинский В. Я., Полищук В. П. и др.* Проектирование железобетонных конструкций: Справочное пособие / Под ред. А. Б. Гольшева. - К.: Будівельник, 1985. - 496 с.
16. *Кемени Дж., Снелл Дж.* Конечные цепи Маркова. - М.: Мир, 1984. - 213 с.

Получено 11.04.96