

621.039.5

В 74

ISSN 0205—4671

МИНИСТЕРСТВО АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
И ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

СЕРИЯ:
Физика
ядерных реакторов

ВЫПУСК

5

1991

621.039.5
674

МИНИСТЕРСТВО АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
И ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ им. И.В. КУРЧАТОВА

ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

СЕРИЯ

ФИЗИКА ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

ИЗДАЕТСЯ С 1973 г.

Федеральное государственное
бюджетное учреждение
"Национальный исследовательский
"Курчатовский институт"
Центральная научная библиотека
Тематический выпуск

выпуск 5

ДИНАМИКА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

**"ТРЕНАЖЕРЫ И МОДЕЛИРУЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ
ДЛЯ УСТАНОВОК С ЯДЕРНЫМИ РЕАКТОРАМИ"**

Часть I.

МОСКВА—1991

д.м. 62414

Выпуски "Динамика ядерных энергетических установок"
подготавливаются НИИ механики при Нижегородском университете

Редакционная коллегия серии:

А.Ю. Гагаринский (гл. редактор), С.М. Зарицкий (зам. гл. редактора),
В.Ф. Колесов, Т.П. Федосеева (отв. секретарь), Я.В. Шевелев

Редакционная коллегия выпуска:

А.Е. Крошилин, Б.И. Моторов, В.М. Новиков, Е.Ф. Сабаев,
Б.З. Торлин, Я.В. Шевелев, С.Б. Шихов, С.Д. Малкин

Рецензент данного выпуска д-р техн. наук С.Д. Малкин

В выпусках "Динамика ядерных энергетических установок" публикуются материалы по следующим вопросам:

- математическое моделирование динамических процессов в ЯЭУ и их элементах;
- результаты экспериментов по устойчивости стационарных процессов и обоснованию математических моделей динамики ЯЭУ;
- расчетные исследования переходных и аварийных процессов;
- расчетные исследования устойчивости стационарных режимов ЯЭУ;
- диагностика ЯЭУ;
- описания и аннотации программ расчетов динамики и экспериментальных исследований.

Issues of "Dynamics of nuclear power plants" contain the following information:

- mathematical simulation of dynamic processes in NPP and their components;
- experimental results on the stability of stationary processes and the definition of mathematical models of the NPP dynamics;
- design analysis of transient and emergency operation;
- design analysis of the stationary mode stability;
- NPP diagnostics;
- code descriptions and summaries for the dynamics designs and experimental studies.

ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРЕНАЖЕРОВ В НИТИ

В.И. Аксенов, А.В. Алиев, В.А. Ефимов, А.И. Колесников, В.А. Свиридов, А.М. Чупалов

Рассматриваются особенности и характеристики исследовательских тренажеров, созданных в институте для отработки потенциально опасных режимов испытаний ЯЭУ, оптимизации алгоритмов управления и обучения персонала.

A HISTORY OF DEVELOPING AND APPLYING SIMULATORS AT R&D TECHNOLOGY INSTITUTE. V.I. AKSENOV, A.V. ALIYEV, V.A. YEFIMOV, A.I. KOLESNIKOV, V.A. SVIRIDOV, A.M. CHUPALOV. Properties and specific features of research simulators developed at the institute to simulate potentially dangerous modes of NPP testing, optimize algorithms for control and staff training are discussed.

Для обеспечения безопасности испытаний экспериментальных ЯЭУ на стендах Научно-исследовательского технологического института (НИТИ) силами специалистов института создан ряд исследовательских тренажеров, обеспечивших обучение операторов управления, исследование потенциально опасных режимов с участием человека-оператора, исследование новых алгоритмов и способов управления установкой и отображения информации о процессах, протекающих в ЯЭУ.

Многофункциональность создаваемых тренажеров и стремление повысить их эффективность при минимуме материальных затрат привели к необходимости разработки и использования оригинальных технических решений. К числу важнейших особенностей созданных исследовательских тренажеров следует отнести:

— обеспечение более высокой точности моделирования по сравнению с учебными тренажерами;

— моделирование всего оборудования и систем, включая системы автоматического управления, с сохранением штатных устройств только на лицевых панелях пульта управления;

— использование в качестве вычислительной базы всех тренажеров мощной вычислительной системы, включающей универсальные ЭВМ, объединенные с использованием современных методов технологии локальных вычислительных сетей;

— использование специально разработанных для функционирования в жестких условиях реального времени высокоскоростных унифицированных систем обмена информацией вычислительной системы с пультами управления;

— радикальное повышение роли и значения средств системного и сервисного программного обеспечения.

В связи с тем, что одной из основных задач создания исследовательских тренажеров является проверка безопасности проведения экспериментов на дейст-

вующих ЯЭУ в режимах, нередко отличающихся от проектных, математические модели для них должны быть близки по точности к расчетным моделям. Практически точность математической модели исследовательского тренажера ограничивается только возможностями технических средств реализации этих моделей в масштабе реального времени.

Так как в процессе испытаний установок оборудование, алгоритмы управления совершенствуются и модернизируются, исследовательский тренажер должен допускать легкую модификацию. Этого проще всего добиться, моделируя все оборудование, включая системы автоматического управления. В этом еще одно отличие от учебных тренажеров, в которых широко используют элементы, а иногда и целые системы реальной аппаратуры.

Для того чтобы точность математической модели для исследовательского тренажера была сопоставима с точностью комплексной всережимной модели для расчетных исследований, необходимо иметь мощную вычислительную систему. При этом вполне естественным является использование единой вычислительной системы в режиме разделения времени для всех исследовательских тренажеров. Эта же вычислительная система может обеспечивать расчетные исследования и выполнение других работ. На первом этапе развития института такой единой технической базой была специально разработанная автоматизированная гибридная вычислительная система, состоящая из универсальных цифровых и аналоговых вычислительных машин и системы связи между ними. Базовыми ЭВМ в единой многоцелевой вычислительной системе являлись "мощные" для того времени ЦВМ БЭСМ-6.

Из-за недостаточной надежности, невысокой точности и низкой оперативности аналоговые машины постепенно были выведены из состава единой вычислительной системы, а в ее состав введены мини-ЭВМ М-7000, СМ-2, затем СМ-1210.

Все ЭВМ объединены в локальную вычислительную сеть с помощью диалоговой коммуникационной системы, созданной на базе ЭВМ "Электроника-60" и обеспечивающей как режим реального времени, требующий высокой пропускной способности и малого времени цикла взаимного обмена между ЭВМ (0,2 с), так и работу системы коллективного пользования вычислительными ресурсами. Коммуникационная система реализована в виде моноканала с внутренним взаимодействием на базе общей шины ЭВМ "Электроника-60", при этом ее оперативная память является общей для всех машин абонентов. Коммуникационная система обеспечивает синхронизацию машин-абонентов за счет обмена сигналами прерывания с их аппаратной буферизацией при появлении очереди необработанных прерываний и временное разделение фаз записи и чтения информации в общую память. При этом область, доступная каждому из работающих в данной конфигурации абонентов, ограничена с помощью регистров приписки и защиты.

Связь органов управления и индикации, представленных на пульте управления, с вычислительной системой обеспечивается системой обмена информацией. Необходимость работы в масштабе реального времени предъявляет к системе обмена высокие требования по скорости обмена информацией и экономии затрат процессорного времени на организацию обмена. Использование для этих целей промышленных устройств связи с объектом (УСО) оказалось нецелесообразным, так как:

— УСО подключается в основном к программным каналам и требует больших затрат процессорного времени;

— состав УСО не обеспечивает подключения в полном объеме органов управления и индикации (например, вращающихся трансформаторов, сельсинов, шаговых двигателей, указателей уровня жидкости и т.д.);

— УСО размещается в помещениях ЭВМ и в больших тренажерных системах требует прокладки большого количества проводных связей, усложняющих монтаж.

Разработанная и используемая в институте унифицированная система обмена информацией имеет магистральный принцип ввода-вывода информации, подключается к каналу прямого доступа в память одновременно к двум ЭВМ, обеспечивает скорость обмена до 8000 кбайт/с и размещается в каркасах пультов.

При этом в десятки раз сокращается количество проводных связей, а следовательно, и монтажных работ.

Стремление повысить производительность труда при разработке моделей процессов и систем, получить универсальные решения для ряда тренажерных систем и максимально использовать производительность имеющихся ЭВМ привело к усилению роли системного и сервисного математического обеспечения тренажеров.

Системное математическое обеспечение в настоящее время представляет собой распределенную операционную систему, при создании которой широко ис-

пользованы средства и структуры стандартных операционных систем. На каждой из ЭВМ выделяются мониторы реального времени и система доступа к данным, обеспечивающая единый интерфейс для всех прикладных программ. Наличие этих двух составляющих позволяет полностью исключить специфику реального времени из моделирующих программ, что упрощает их написание и отладку.

Сервисное математическое обеспечение позволяет реализовать широкие функциональные возможности тренажеров непосредственно в процессе обучения и в процессе предтренажерной подготовки. В рамках сервисного обеспечения созданы информационно-справочные подсистемы преподавателя и обучаемых, подсистема контроля и оценки действий оператора, базы данных исходных и аварийных состояний, подсистема регистрации действий оператора.

Перечисленные выше подходы сформировались в течение многолетней практики создания исследовательских тренажеров.

Первый исследовательский тренажер такого типа — имитатор ЯЭУ был создан в НИТИ в 1968 г. *) В качестве вычислительной системы тренажера использовалась гибридная вычислительная система в составе ЦВМ М-220 и двух аналоговых машин МН-14. Позднее в состав этой системы была включена ЭВМ БЭСМ-6. Пульт руководителя обучения представлял собой небольшую переносную панель с функциональной клавиатурой.

На базе этой же вычислительной системы в 1976 г. создается комплексный исследовательский тренажер, включающий 4 центральных пульта, с которых 4 оператора могут управлять всеми основными подсистемами объекта управления.

Для системы обмена информацией потребовалось разработать специальные электронные преобразователи: код — синхроноскоп, блок фазового детектирования и др. На уровне системного обеспечения реализована работа тренажера в различных конфигурациях: раздельная работа четырех подсистем, их попарная работа, совместная работа всех четырех подсистем — комплексный режим. Переход из одной конфигурации тренажера в другую занимает 7—10 мин. Всего в комплексном тренажере реализовано более 400 аварийных вводных с возможностью их наложения в произвольном порядке. На тренажере выполнен большой объем исследований потенциально опасных режимов работы установки с наложением отказов в оборудовании и системах управления, исследование физиологических характеристик деятельности операторов в экстремальных ситуациях и др.

Следующий исследовательский тренажер разрабатывался в период появления мини-ЭВМ и новой элементной базы (1982 г.). В его составе появляется ЭВМ М-7000, дисплейный пульт руководителя обучения, унифицированная система обмена информацией.

*) См.: Имитатор ядерной энергетической установки на базе комплексной вычислительной системы/Ю.В. Виноградов, А.И. Волков и др. // Атомная энергия. 1969. Т. 26. Вып. 6. С. 537.

Появилась возможность существенно расширить сервис преподавателя, автоматизировать контроль работоспособности мнемознаков, блоков питания. Стандартизация интерфейсов позволила легко подключить к тренажеру опытный образец дисплейного пульта управления. В дополнение к исследованиям потенциально опасных режимов и обучению на тренажере выполнен большой объем исследований новых способов отображения информации о состоянии ЯЭУ и управления ею с использованием дисплейного пульта управления, сравнительный анализ деятельности операторов за дисплейным и традиционным пультами управления.

Наиболее полное воплощение сформулированные выше подходы получили при создании тренажерного комплекса, включающего 4 комплексных тренажера с местными постами и обеспечивающего в комплексном режиме обучение 21 оператора. Комплекс создан в 1986 г. Его основу составляют ЭВМ БЭСМ-6 и три ЭВМ СМ-2. Из вычислительной системы на пультах и местные посты выводятся 500 непрерывных (показывающие приборы) и 7500 дискретных сигналов (многознаки и сигнализаторы), с пультов вводится более 8000 дискретных сигналов (позиции переключателей). В тренажерном комплексе реализовано 16 сочетаний режимов работы комплексных тренажеров. Управление работой комплекса осуществляется с двух пультов руководителей обучения, оснащенных видеотерминальными устройствами. Сервисное математическое обеспечение позволяет осуществлять регистрацию и воспроизведение моделируемых процессов и действий оператора в реальном, замедленном или ускоренном масштабах времени, "фотографирование" мгновенных состояний с последующим запуском из этих состояний, позволяет использовать созданные автоматизированные справочные системы, "советчики оператора", систему оценки действий обучаемых. Запрограммировано 600 аварийных вводных, обеспечивающих практически неограниченное (с учетом наложения отказов) число аварий ситуаций. На тренажере выявлен ряд замечаний по алгоритмам автоматического управления, предложения по их корректировке были переданы разработчикам соответствующих систем.

В 1987 г. введен в строй исследовательский тренажер, в качестве вычислительной базы на котором использовалась многопроцессорная ЭВМ ПС-2000. ПС-2000 включает в себя мультипроцессор и ЭВМ СМ-2М. В используемой конфигурации мультипроцессор включает 32 процессорных элемента, каждый из которых имеет оперативную память 16 К слов по 24 разряда в слове. Такт исполнения команды — 0,3 мкс (общая производительность до 100 млн опер./с). СМ-2М включает два процессора с оперативной памятью 128 К 16-разрядных слов, средняя производительность каждого процессора — 400 тыс. опер./с. В настоящее время все непрерывные процессы в паропроизводящей установке реализованы на СМ-2М, а ПС-2000 используется для моделирования работы штатной системы логического управления. Особенно noteworthy моделирования системы управления в этом тренажере является то, что здесь были использованы непосредственно программы штатной системы управления, написанные на специализированном языке, а для их реализации на ПС-2000 был создан программно-аппаратный интерпретатор. Так как исследовательский тренажер был создан до пуска реальной ЯЭУ, на нем были выявлены недоработки штатных алгоритмов управления в эксплуатационных и аварийных режимах.

Разработанные подходы позволили значительно ускорить сроки и снизить стоимость создания исследовательских тренажеров. Дальнейшее снижение стоимости создаваемых тренажеров станет возможным при органичном слиянии разработки исследовательских тренажеров с процессом проектирования системы управления ЯЭУ, особенно при переходе на использование дисплейных пультов и цифровых систем управления.

В настоящее время в институте ведется разработка новых перспективных технологий создания тренажеров с целью снижения их стоимости, сроков разработки и повышения эффективности использования.

Статья поступила в редакцию

25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер.
Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 3—5.

СИСТЕМНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ТРЕНАЖЕРОВ

А.В. Алиев, С.В. Батраков, А.Х. Хайрутдинов, А.М. Чупалов

Рассматриваются основные задачи и пути реализации системного математического обеспечения исследовательских тренажеров ядерных энергетических установок, которое является одной из наиболее сложных и емких частей их программного обеспечения.

SYSTEM SOFTWARE FOR RESEARCH SIMULATORS. A.V. ALIYEV, S.V. BATRAKOV, A.KH. KHAIRUTDINOV, A.M. CHUPALOV. Considered are basic problems and ways to realize system software of research NPP simulators which is considered to be one of the most complex and capacious software portions.

Среди разнообразного круга задач, решение которых возлагается на класс исследовательских тренажеров (ИТ), можно выделить такие, как обучение оперативного персонала, подготовка операторов перед проведением экспериментального режима на ЯЭУ, исследование потенциально опасных режимов работы установки, апробация новых алгоритмов управления, разработка перспективных пультов управления и т.д.

Уже этот неполный перечень показывает, что реализацию данных задач может обеспечить только многофункциональное, гибкое, легко настраиваемое системное математическое обеспечение. Высокие требования к точности и полноте моделирования реальных процессов в ИТ приводят к необходимости создания таких систем на базе высокопроизводительных вычислительных комплексов (ВВК), обеспечивающих функционирование системы в реальном времени.

Одним из подходов к созданию ВВК является построение их на базе разнородных средств вычислительной техники, имеющих различную архитектуру. Такой подход позволяет достаточно полно использовать архитектурные преимущества каждой из ЭВМ, включаемой в состав ВВК. Но это требует и решения таких проблем, как объединение разнородных ЭВМ в технологическую сеть, доработка операционных систем для использования в реальном времени, создание инструментальных средств отладки и т.д.

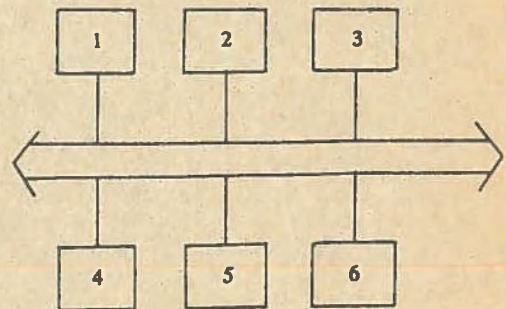
Доработка стандартных операционных систем (ОС), поставляемых с ЭВМ, связана как с созданием специальных тренажер-ориентированных функций, так и с необходимостью повышения качества реализации отдельных процедур и механизмов этих ОС вследствие жестких требований реального времени. В качестве примера можно привести разработку драйверов для тех устройств, которые используются при работе в реальном времени: устройства связи с пультами управления, устройства межмашинной связи, дисплеи. При этом затраты процессорного времени на выдачу информации на дисплеи могут быть сокращены в 2—3 раза.

Ядром разрабатываемого системного обеспечения являются мониторы реального времени, организующие вычислительный процесс. Дисциплина диспетчеризации для каждого конкретного ИТ выбирается по

результатам моделирования. В нашем случае использовались модели вычислительного процесса, построенные на базе сетей Петри.

Связующим звеном ВВК реального времени является высокоскоростное сетевое оборудование, системное обеспечение которого реализует синхронизацию отдельных компонент системы, сборку требуемых для текущей работы составляющих ВВК в подсистемы, обмен данными между ними в составе различных аппаратных и программных конфигураций. В качестве варианта реализации ВВК на рисунке приведена структура вычислительного комплекса одного из ИТ, в котором основные динамические модели реализованы на ЭВМ 1. К ЭВМ 4 и 5 через высокоскоростную систему обмена информацией подключены пульта управления объектом. Шаг обмена информацией с пультами составляет 0,2 с. С таким периодом в ВВК вводятся и обрабатываются значения более 8000 дискретных каналов, формируются и выводятся значения более 7500 дискретных и 500 аналоговых каналов.

На ЭВМ 6 реализуются сервисные функции; такие, как организация взаимодействия с пультом руководителя обучения, обслуживание цветных графических мониторов, установленных на рабочих местах операторов, работа с базами данных различного назначения, контроль и оценка деятельности обучаемых и некоторые другие функции.



Структура вычислительного комплекса одного из ИТ: 1 — моделирующая ЭВМ; 2 — сетевой процессор; 3 — общая память на 64 кбайт; 4—5 — ЭВМ связи с пультами управления и моделирования систем автоматики; 6 — ЭВМ, реализующая сервисные функции

Процессор ЭВМ 2 является сетевым процессором, и на него возложены функции управления работой ЭВМ, подключенных к сети, как в реальном времени, так и в режиме разделения времени. Кроме того, системное обеспечение ЭВМ 2 обеспечивает синхронизацию при обмене данными между ЭВМ сети через общую память (3).

В задачи сетевой ЭВМ входит: управление шагом синхронизации, инициализация вычислительного комплекса, управление конфигурацией ВВК, защита от интерференции данных, контроль за работой ЭВМ в реальном времени, реконфигурация системы в случае сбоев и отказов сетевого оборудования или отдельных составляющих ВВК. В ИТ к программным модулям, организующим взаимосвязь между моделями и пультами управления объектами, предъявляются дополнительные требования по возможности оперативной замены как отдельных элементов пультов управления, так и по их полной подмене на перспективные с целью проведения их всесторонних исследований.

Современные исследовательские тренажеры предполагают использование широкого спектра различных устройств отображения информации для различных целей, среди которых можно выделить:

- предъявление обучаемым справочной и учебной информации в виде статических и динамических образов;

- отображение на рабочих местах исследователей состояния исследуемых систем в графическом, табличном или других видах;

- оперативный контроль и управление ходом учебного занятия преподавателем.

Информация, подаваемая на алфавитно-цифровые и цветные графические дисплеи, может поступать как из баз данных, так и оперативно формироваться модулями системного обеспечения. При этом особые требования по времени выполнения предъявляются к модулям, формирующим графические образы в реальном времени. Так, время смены изображения на экране не должно превышать 1—2 с, а период выдачи информации находится в интервале от 0,2 до 1 с.

Для повышения эффективности разработки подсистем представления информации при создании ИТ широко использовалась связка из графического редактора и подсистемы динамического отображения в реальном времени, которые могут быть использованы и раздельно.

В дополнение к реализуемым в обычных тренажерах режимам регистрации и документирования состояний информационного и моторного полей и действий руководителя обучения в ИТ обеспечивается регистрация в реальном времени произвольного подмножества моделируемых аналоговых и дискретных пе-

ременных, для чего разработана оперативно настраиваемая система регистрации, позволяющая перед проведением исследовательского режима на ИТ задать список переменных, шаг регистрации, время регистрации и некоторые другие параметры.

Специфической особенностью, вытекающей из определенных выше задач исследовательских тренажеров, является необходимость совместной обработки результатов экспериментальных исследований на стендовых установках, данных, полученных на точных математических моделях, и информации, зарегистрированной на ИТ. Основой для решения этой задачи является создание универсальных методов доступа к данным независимо от локализации и типа источника информации.

Важным элементом технологии создания сложных программных комплексов является система отладки, обеспечивающая средствами отладки программ все этапы разработки и сопровождения программного продукта. При создании ИТ на базе ВВК в составе системы отладки использовались три независимых отладчика:

- локальный, используемый для отладки функциональных моделей на отдельных ЭВМ;

- системный, используемый при комплексной отладке всего комплекса программ в реальном времени;

- сетевой, реализованный на сетевой ЭВМ и позволяющий контролировать и изменять любую информацию, циркулирующую в сети, управлять временными интервалами в составе временной диаграммы работы ИТ.

Из других блоков, реализуемых системным математическим обеспечением ИТ, необходимо выделить модули, реализующие задание аварийных ситуаций. Особенностью их реализации является то, что они кроме тренажерных функций (таких, как различные способы задания и отмены аварий, выдача справочной, учебной и методической информации по вводным), должны обеспечивать простые и удобные способы внесения в систему новых аварийных ситуаций.

Даже краткое рассмотрение особенностей системного математического обеспечения ИТ показывает, что ИТ относятся к классу сложнейших программно-аппаратных систем. По своей сложности и функциональному наполнению они не уступают, а во многих случаях и превосходят такие известные системы, как тренажерные и информационно-измерительные комплексы реального времени.

Статья поступила в редакцию
25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер.
Физика и техника ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 6—7.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СУДОВОГО ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА

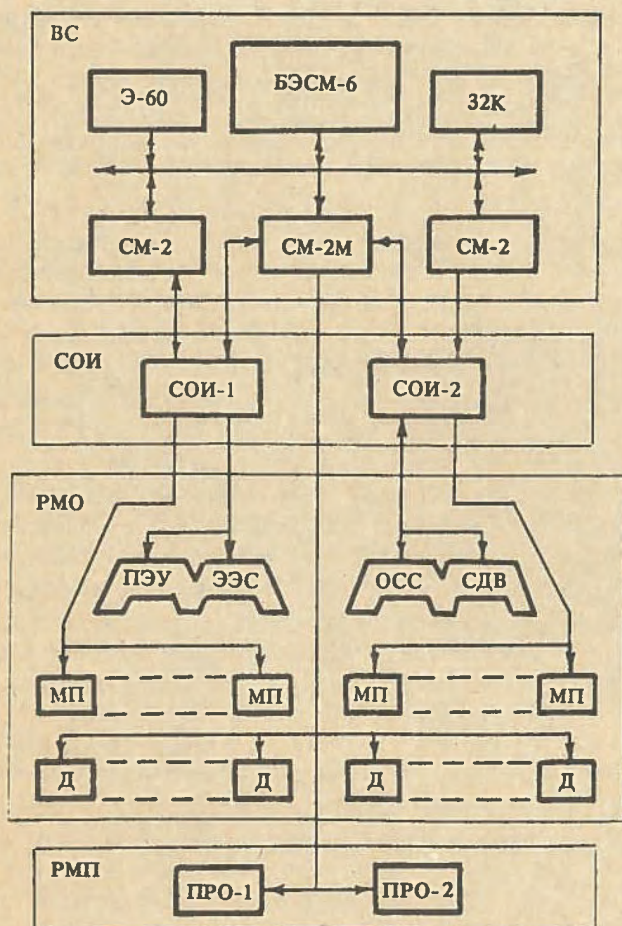
В.И. Аксенов, Ю.А. Морозов, С.М. Дзигаленко, В.М. Привалов

Приводятся структура, краткое описание и обоснование выбора технических средств судового тренажерного комплекса.

TECHNICAL MEANS OF A SHIP'S SIMULATING COMPLEX. V.I. AKSENOV, YU.A. MOROZOV, S.M. DZIGALENKO, V.M. PRIVALOV. Structure, brief description and substantiation of the ship's simulating complex technical means are proposed.

Укрупненная структурная схема технических средств (ТС) тренажерного комплекса приведена на рисунке. ТС комплекса можно разделить на 4 составные части:

- вычислительная система (ВС);
- система обмена информацией (СОИ);
- рабочие места операторов (РМО);
- пульты руководителей обучением (ПРО).



Структурная схема судового тренажерного комплекса: РМП — рабочие места преподавателей; 32 К — оперативная память; Д — цветные и черно-белые дисплеи; ПЭУ, ЭЭС, ОСС, СДВ — центральные пульты управления; Э-60 — микроЭВМ "Электроника"

Вычислительная система. Основными критериями при создании ВС являются производительность входящих в ее состав вычислительных машин, обеспечивающая моделирование в реальном масштабе времени сложных физических процессов объекта, и наличие развитой системы ввода/вывода информации, позволяющей подключать к ВС то множество средств управления и индикации, которыми располагают центральные пульты (ЦП) и местные посты (МП) управления объектом. Мощные универсальные вычислительные машины, обладающие достаточно высоким быстродействием и точностью выполнения арифметических операций, как правило, не отвечают требованиям второго критерия. Поэтому было принято решение о создании ВС, включающей в себя два основных звена:

— центральное, обеспечивающее вычислительными ресурсами моделирование непрерывных процессов по всем подсистемам объекта;

— периферийное, ориентированное в основном на выполнение функций связи с центральными пультами, местными постами управления и на моделирование логики работы систем автоматического управления и централизованного контроля.

Взаимодействие этих звеньев ВС между собой обеспечивается диалоговой коммуникационной системой (ДКС).

При выборе центрального звена ВС определяющими являлись следующие условия:

- достаточно высокая производительность ЭВМ;
- большой диапазон представления чисел, обеспечивающий точность вычислений;

— наличие развитой операционной системы (ОС), обеспечивающей гибкое распределение ресурсов ЭВМ в процессе работы с минимальными затратами машинного времени;

— богатое общее математическое обеспечение, включающее библиотеки стандартных программ, эффективные трансляторы с языков высокого уровня, средства отладки программ.

Этим условиям (на этапе разработки) удовлетворяла ЭВМ БЭСМ-6, имеющая быстродействие 1 млн операций/с, диапазон представления чисел от 10^{-19} до 10^{19} и объем оперативной памяти 128 К 50-разряд-

ных слов. Скорость обмена информацией через специально разработанный канал — 2 Мбайт/с.

Периферийная вычислительная система построена на базе двухпроцессорных ЭВМ СМ-2 (СМ-2М). Ее архитектура позволяет организовать достаточно быстрый ввод/вывод большого количества информации. Кроме того, эта машина обладает достаточно высоким быстродействием при выполнении логических операций, преобладающих при моделировании систем управления.

Основные характеристики ЭВМ СМ-2:

- объем оперативной памяти — 256 К;
- быстродействие — 400 тыс. операций/с;
- максимальное быстродействие канала прямого доступа в память (КПДП) — 1,4 Мбайт/с.

В периферийном звене ВС используются две машины СМ-2 и одна СМ-2М. На СМ-2 № 1 моделируется логика работы оборудования и автоматики установки ПЭУ и ЭЭС, на СМ-2 реализованы аналогичные функции для ОСС и СДВ.

На ЭВМ СМ-2М возложена большая часть функций по управлению процессом обучения и обеспечению учебными и методическими материалами в виде статических и динамических схем, таблиц, графиков, рисунков и т.д., выводимых на экраны цветных и черно-белых дисплеев.

Объединение ЭВМ в единую ВС обеспечивается ДКС, которая реализована в виде моноканала, при этом память ЭВМ "Электроника-60" является общей памятью для всех ЭВМ-абонентов. ДКС обеспечивает синхронизацию работы машин-абонентов.

Интерфейс моноканала снабжен регистрами приписки и защиты, с помощью которых доступ абонентов к общей памяти ограничен выделенной областью. Таким образом обеспечивается защита абонентов от несанкционированного вмешательства.

Система обмена информацией. СОИ обеспечивает связь органов управления и индикации рабочих мест операторов (центральных пультов и местных постов управления) с ВС.

Данный тренажерный комплекс отличается от предшествующих наличием местных постов, которые обеспечивают ручное и дистанционное управление техническими средствами судна.

Поэтому объем информации ввода/вывода в этом комплексе достаточно большой и накладывает особые требования к скорости ввода/вывода и затратам процессорного времени на организацию обмена информацией. Это заставило авторов отказаться от использования в тренажерном комплексе промышленных устройств сопряжения с объектом (УСО), которыми комплектуются СМ ЭВМ.

Основное отличие разработанной авторами системы обмена информацией от УСО заключается в том, что она по отношению к СМ ЭВМ является периферийным устройством, подключенным к КПДП.

С целью оптимизации структуры тренажерного комплекса, учитывающей как методические особенно-

сти его использования на различных стадиях подготовки операторов, так и удобство наладки и эксплуатации комплекса, СОИ разделена на две автономные подсистемы: СОИ-1 и СОИ-2 (см. рисунок).

СОИ-1 предназначена для тренажеров ПЭУ и ЭЭС, СОИ-2 — для ОСС и СДВ.

Конструктивно СОИ выполнена в виде блоков (крейтов) 480 x 200 x 220 мм. В каждом из них может быть установлено до 20 типовых элементов замены (ТЭЗ) — печатных плат 160 x 155 мм с радиоэлементами.

Все блоки ввода-вывода СОИ, кроме блока управления, размещены непосредственно в стойках центральных пультов и местных постов управления. Блок управления обеспечивает обмен информацией с двумя ЭВМ СМ-2 и подключение 15 блоков ввода/вывода информации, распределенных по помещениям тренажерного комплекса и удаленных от него на расстояние до 20 м. Кроме того, интерфейсные модули блоков позволяют соединять последовательно до 6 блоков ввода/вывода информации, расположенных на расстоянии до 20 м друг от друга, и одним кабелем подключать их к блоку управления.

Таким образом, расположение блоков ввода/вывода информации непосредственно в пультах управления позволило сократить количество проводных связей, следовательно, и объем монтажных работ.

СОИ обеспечивает:

— ввод в ВС дискретной информации с органов управления	8000 бит
— ввод в ВС аналоговой информации с вращающихся трансформаторов и потенциометров	125 каналов
— вывод информации на стрелочные (электромагнитные) приборы	520 каналов
— вывод информации на стрелочные приборы с шаговыми двигателями	47 каналов
— вывод информации на синхроскопы	6 каналов
— вывод информации на четырехдекадные цифровые табло	22 канала
— вывод информации на световые и звуковые сигнализаторы	7500 каналов
— скорость ввода (вывода) информации в ЭВМ СМ-2 (СМ-2М)	400 тыс. 16-разрядных слов в 1 с

Рабочие места операторов. Центральные пульта управления, приборы аварийного управления, станции (щиты) местных постов управления отдельным оборудованием (компрессорами, холодильными машинами и т.д.) по внешнему исполнению являются копиями штатного оборудования судна.

Часть оборудования с ручным управлением на местных постах представлена в виде стоек, щитов, стенов с мнемосхемами, на которых ручное управление арматурой имитируется переключателями и тумблерами.

На ЦП и МП установлены алфавитно-цифровые и цветные дисплеи для представления на экранах во время обучения справочных таблиц, рекомендаций, алгоритмов управления, схем, графиков и другой дополнительной информации.

Рабочие места инструкторов обучения. В тренажерном комплексе реализовано два рабочих места инструкторов, именуемых пультами руководителей обучением (ПРО-1, ПРО-2). С ПРО-1 осуществляется оперативное управление комплексными тренажерами ПЭУ и ЭЭС, с ПРО-2 — комплексными тренажерами ОСС и СДВ.

В состав каждого ПРО (см. рисунок) входят:

1. Алфавитно-цифровой дисплей ВТА-2000/11, предназначенный для выполнения операций по подготовке тренажеров к работе и для ввода аварийных ситуаций.

На экран дисплея выводятся:

- результаты диагностики состояния средств вычислительной техники и средств обмена информацией;
- индикация заданных исходных состояний тренажеров;
- таблицы аварийных вводных;
- инструкции и справочная информация для преподавателя по вопросам управления тренажером и организации учебного процесса.

2. Блок управления, обеспечивающий оперативное управление тренажерами в процессе обучения.

Лицевая панель блока имеет функциональную клавиатуру и индикацию и разбита на несколько зон:

- задание режима, пуск и останов;
- масштаб времени;
- регистрация (непрерывная и “фотографирование”);
- воспроизведение;
- советчик оператора;

— информация преподавателю;

— коррекция вводных.

3. Печатающее устройство Д М-180, предназначенное для вывода на печать информации по диагностике состояния технических средств и значений периодически контролируемых параметров.

4. Цветное видеоконтрольное устройство (ЦВКУ), предназначенное для вывода на экран вспомогательной, справочной и учебной документации: схем; графиков, алгоритмов, чертежей, внешних видов устройств и т.д.

Сервисное обеспечение тренажерного комплекса в значительной степени облегчает работу преподавателей по руководству процессом обучения, повышает эффективность учебного процесса.

Особенно следует отметить:

— “фотографирование” промежуточных исходных состояний в процессе обучения;

— изменение масштаба времени моделирования протекающих процессов (ускорить, замедлить);

— регистрацию 30-минутного фрагмента для последующего просмотра в любом масштабе времени, в прямом и обратном направлении.

Рассмотренный выше комплекс технических средств обеспечил выполнение всех требований, предъявлявшихся к тренажерной системе.

Статья поступила в редакцию
25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер.
Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 8—10.

УДК 621.039

ОБЗОР МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕНАЖЕРОВ АЭС

И.М. Аршавский, А.Е. Крошилин, Е.Ф. Селезнев

Дается описание методов построения основных компонент математического обеспечения полномасштабных тренажеров АЭС.

THE REVIEW OF CONSTRUCTION METHODS FOR AES TRAINING SIMULATOR SOFTWARE. I.M. ARSHAVSKY, A.E. CROCHILIN, E.F. SELEZNEV. The description of construction methods of main component for AES training simulator software is produced.

Программное математическое обеспечение тренажеров АЭС имеет ряд специфических особенностей, которые во многом определяют его структуру и подходы к разработке. Перечислим основные из них:

1) большой объем программного обеспечения, включающий математическое описание сложных физических процессов;

2) большой объем информационных связей и необходимость создания развитой системы отображения информации;

3) жесткие ограничения на быстродействие программ, связанные с необходимостью моделирования в

режиме реального времени или в ускоренном масштабе времени (для медленных процессов).

Появление все более производительных ЭВМ приводит к постоянному усложнению математических моделей, входящих в состав программного обеспечения тренажеров, в рассмотрение включаются все более сложные аварийные процессы. Современные полномасштабные тренажеры воспроизводят или имитируют в реальном времени динамику пространственного распределения энерговыделения в реакторе, аварийные процессы, приводящие к вскипанию воды в первом контуре АЭС с учетом эффектов тепловой и скоро-

стной неравновесности двухфазной среды. В настоящее время разрабатываются тренажеры, в которых будет включена возможность воспроизведения тяжелых запрограммированных аварий, приводящих к расплавлению активной зоны. Вместе с тем многие аварии описываются со значительными упрощениями и ограничениями, что, в свою очередь, связано с ограничением современных вычислительных мощностей.

Современные полномасштабные тренажеры базируются на распараллеливании процесса моделирования с использованием локальных сетей ЭВМ. В локальную сеть объединяются либо несколько ЭВМ класса супермини (например, три ЭВМ *GOULD*) или от одного до двух десятков микроЭВМ. Распределение конфигурации вычислительной установки приводит к необходимости создания специальной операционной системы реального времени, связанной с сетевым программным обеспечением. Важным элементом программного обеспечения тренажеров является обмен информацией между элементами программного обеспечения (так называемые *executive system*). Элементы программного обеспечения тренажеров (математические модели, программы отображения информации и т.д.) связаны, как правило, через общую область оперативной памяти ЭВМ. Организация и сопровождение общей области, а также организация вычислительного процесса являются основными функциями *executive system*. Следующим наиболее важным элементом программного обеспечения являются собственно математические модели, которые реализуются с широким применением модульного принципа. При этом не только осуществляется разбиение всех процессов и оборудования АЭС на группы (физика реактора, теплогидравлика первого контура и т.д.), но и создаются универсальные библиотеки моделей (насосы, теплообменники и т.д.) и пакеты автоматизации проектирования.

Ниже приводится описание методов построения основных компонент математического обеспечения полномасштабных тренажеров. При подготовке материала использованы отчеты ведущих западноевропейских и американских фирм — производителей тренажеров.

Исполняющая система (ИС). ИС тренажера реального времени облегчает выполнение и управление как всем программным обеспечением тренажера, так и его отдельными частями, позволяет выполнять программы как в реальном времени, так и с заданной скоростью. В функции ИС входит распределение времени и контроль за одной или несколькими задачами, входящими в модель. ИС также облегчает оператору или инструктору доступ к информации в базе данных тренажера.

ИС — это диалоговая система, в состав которой входят специфические команды систем реального времени, такие, как:

— проверка, наблюдение и модификация информации в базе данных;

— разделение времени и установление очередей для задач, входящих в модель;

— запуск и останов модели;

— сброс и восстановление данных на диск;

— сбор статистики как для всего тренажера в целом, так и для отдельных задач, входящих в его состав;

— ускорение и замедление развития моделируемого процесса.

Исполняющая система обеспечивает технологию разработки и выполнения программного обеспечения тренажера и является обязательным компонентом больших программных систем.

Модели гидродинамики течения теплоносителя в первом контуре реакторной установки. Ведущие западные фирмы — производители тренажеров для АЭС используют модели гидродинамики первого контура (т.н. *RCS-модели*), обладающие следующими возможностями:

— моделирование однофазных и двухфазных потоков, включая обращенное и противоточное течение фаз;

— принудительная и естественная циркуляция двухфазных потоков, включая срыв циркуляции в результате образования гидрозатворов и паровых пробок;

— неполное перемешивание теплоносителя в камерах смешения при несимметричной работе реактора;

— детальный расчет коэффициентов теплоотдачи и критического теплового потока в однофазном и двухфазном случаях;

— возможность одновременного наличия недогретой (или насыщенной) воды, перегретого (или насыщенного) пара, неконденсируемых газов;

— образование уровня в реакторе с учетом эффектов набухания;

— моделирование всей области режимов от полного заполнения первого контура водой до полного его опорожнения;

— моделирование любых нормальных и основных аварийных режимов, включая полный разрыв главного циркуляционного трубопровода.

Для обеспечения режима реального времени используются эффективные численные алгоритмы. Несмотря на различие численных схем, используемых в математических моделях различных фирм, все они основаны на едином подходе. Контур циркуляции разбивается на ячейки (контрольные объемы). В подавляющем большинстве случаев используются очень грубые разбиения, например: три ячейки на каждую петлю (холодная нитка, трубчатка парогенератора, горячая нитка), три ячейки на реактор (кольцевой зазор вместе с нижней камерой смешения, активная зона, верхняя камера смешения) и одна ячейка, описывающая компенсатор давления. Ячейки связаны между собой так называемыми границами. Для каждой ячейки записываются обыкновенные дифференциальные уравнения, следующие из законов сохранения массы и энергии. При этом предполагается, что каждая ячейка характеризуется некоторыми осредненными по объ-

ему параметрами. Таким образом, каждая ячейка описывается в точечном приближении. Для каждой границы также записывается обыкновенное дифференциальное уравнение, следующее из закона сохранения количества движения. Изменением кинетической энергии в уравнениях энергии и количества движения в уравнениях импульсов, как правило, пренебрегается. Такой подход приводит к необходимости интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Приведем один из вариантов такой системы уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dM_i}{dt} &= \sum_j G_{ij}; \\ \frac{dU_i}{dt} &= \sum_j G_{ij} h_{ij} + Q_i; \\ \frac{dM_{ei}}{dt} &= \sum_j (1-x) G_{ij} + G_{condi} - G_{evapi}; \\ \frac{dH_{sti}}{dt} &= \sum_j h_{ij} X_{ij} G_{ij} - G_{condi} h_{se} + G_{evapi} h_{sv} + q_i; \\ L_j \frac{dG_j}{dt} + P_{j+1} - P_j &= F_j. \end{aligned}$$

Здесь M — масса; U — энергия; H_{st} — энтальпия пара; G — расход; P — давление; X — массовое паросодержание; M_e — масса воды; h_{se} , h_{sv} — удельные энтальпии воды и пара на линии насыщения; Q — внешний тепловой поток; q — тепловой поток за счет межфазного теплообмена; G_{cond} , G_{evap} — межфазный массообмен; L — коэффициент инерции; i — номер ячейки; j — номер границы.

В данном случае термодинамическое состояние теплоносителя в каждой ячейке описывается четырьмя параметрами (M , M_e , U , H_{st}). Зная эти параметры и привлекая замыкающие термодинамические соотношения, можно получить все остальные параметры, необходимые для описания термодинамического состояния (например, давление). Как правило, предполагается, что каждая ячейка включает две области. Первая содержит воду и насыщенный пар или недогретую воду. Вторая область содержит пар и насыщенную воду или перегретый пар.

Для вычисления потоков энергии $W = G_{ij} h_{ij}$ (или $G_{ij} h_{ij} X_{ij}$) привлекаются геометрические соображения.

Следует отметить, что выписанная система уравнений (с точностью до ее несущественных видоизменений) используется практически всеми ведущими фирмами — изготовителями тренажеров. Иногда к последнему уравнению добавляется алгебраическое соотношение, связывающее скорости паровой и жидкой фаз (т.е. используется модель потока со скольжением). В качестве замыкающих соотношений используются различные упрощения аналогичных соотношений из программ *RELAPS* и *TRAC-PFI*.

Для интегрирования системы дифференциальных уравнений используются частично неявные схемы,

имеющие ограничения Куранта на шаг по времени $\Delta t \leq \Delta x / |V|$. В силу больших размеров ячейки (ΔX шаг по времени может быть достаточно большим (до 0,25 с)). Преобладают две численные схемы: первая основана на эффективной численной схеме *FLASH*, вторая основана на введении дополнительного упрощающего допущения (т.н. гипотеза глобальной сжимаемости), которое фактически заключается в предположении одинаковой скорости падения давления во всех точках контура за исключением компенсатора давления. В обеих численных схемах все границы разбиваются на некритические и критические. В последнем случае уравнение импульсов в выписанной выше системе уравнений заменяется на соотношение $G = G(P, h)$, где G — критический расход; P , h — давление и энтальпия в ячейке, из которой происходит истечение. Таким образом, в случае полного разрыва (*large break*) постулируется критическое истечение в месте разрыва (вычисляемое на основании линейной интерполяции экспериментальных данных или полуэмпирических методик).

Первая численная схема является распространением на двухфазный случай численной схемы, используемой в программе *FLASH*, предназначенной для расчета произвольных гидравлических сетей.

Основные положения численного метода заключаются в следующем (для простоты ограничимся рассмотрением гомогенного случая). Запишем конечно-разностные аналоги дифференциальных уравнений (при этом энтальпии в уравнении энергии будем брать со старого временного слоя):

$$\begin{aligned} \frac{M^i - M_i}{\tau} &= \sum_j G^{ij}; \\ \frac{U^i - U_i}{\tau} &= \sum_j G^{ij} h_{ij}; \\ L_j \frac{G^j - G_j}{\tau} &= P^j - P^{j+1} + F^j. \end{aligned}$$

Определим M и U (как функцию G) из первых двух уравнений, линеаризуем F по G , линеаризуем P по M и U и, наконец, подставим выражение для M и U из первых двух уравнений в третье. Если все вышеперечисленные операции произвести в матричном виде для произвольной геометрии (т.е. произвольной гидравлической сети), то в результате получим систему линейных уравнений $AG = \Phi$ (G — вектор неизвестных расходов) с блочной матрицей вида

$$A = \begin{bmatrix} D_1 & & P_1 \\ & 0 & \\ & D_2 & P_2 \\ & 0 & D_S & P_S \\ 0_1 & 0_2 & 0_S & S \end{bmatrix}$$

Блочный вид матрицы A допускает существенно более эффективные процедуры ее обращения по сравнению с методом исключения Гаусса. В случае системы

из пяти уравнений процедура получения системы линейных алгебраических уравнений полностью аналогична, за исключением того, что давление P представляется в виде функции четырех переменных (M, Me, U, H_{st}). В случае критической границы вместо конечно-разностного аналога уравнения импульсов используется линеаризованное соотношение для расхода критического истечения:

$$G^j = G_j + \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)(P^j - P_j) + \left(\frac{\partial G}{\partial h}\right)(h^j - h_j).$$

Линеаризуя давление и энтальпию (P, h) как функции массы и энергии (M, U), получаем замену уравнению импульсов. Использование последнего уравнения не меняет типа матрицы A . Заметим, что численная схема предполагает вычисление давления как функции M, Me, U, H_{st} (разумеется, при известных геометрических параметрах ячейки). Это приводит к необходимости численного решения двух нелинейных уравнений с привлечением двухпараметрических соотношений, определяющих термодинамические свойства воды и пара.

Центральным положением второй численной схемы является введение дополнительной неизвестной dP/dt , характеризующей скорость падения давления в контуре. Предположение одинаковой скорости падения давления приводит к необходимости использования дополнительного уравнения, которое представляет собой уравнение сохранения объема всего контура. Предположение глобальной сжимаемости включает также использование упрощенного уравнения состояния, в котором свойства жидкости вычисляются при среднем (глобальном) давлении в системе и локальных энтальпиях. Это эквивалентно предположению, что в течение переходного процесса изменения плотности, связанные с изменением давления, малы, или предположению о незначительности отклонений локальных давлений от среднего. Предположение справедливо в том случае, когда время переходного процесса значительно превышает характерное время распространения акустических возмущений.

Если в качестве одной из независимых термодинамических переменных использовать давление, то можно записать:

$$\frac{dM_n}{dt} = A_n + B_n \frac{dP}{dt}.$$

Здесь A, B — коэффициенты, включающие производные от замыкающих термодинамических соотношений.

Суммируя уравнения типа выписанного выше по всем ячейкам контура, получим

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{(W_{1/0} - \sum_n A_n)}{\sum_n B_n},$$

где $W_{1/0}$ — сумма внешних источников массы, n — номер ячейки.

Численная схема состоит из следующих этапов. На первом шаге интегрируются уравнения сохранения

массы для смеси и паровой фазы по явной схеме. Этот шаг заключается в решении выписанных уравнений для dM/dt и dP/dt . Второй шаг заключается в интегрировании уравнений энергии для каждой фазы (записанных в терминах энтальпий) по неявной схеме. Далее решается нелинейное алгебраическое уравнение для среднего давления в системе (суммарный объем, занимаемый двухфазной средой, должен совпадать с физическим объемом системы). Затем скорость изменения массы в каждой ячейке определяется с использованием метода, который обеспечивает сохранение массы системы в целом. Следующим шагом является совместное решение уравнений импульсов для всех некритических границ и уравнений сохранения полной массы во всех внутренних ячейках для вычисления расходов и перепадов давления.

Последним шагом численной схемы является определение расходов паровой и жидкой фаз с использованием модели потока дрейфа.

Для определения теплового потока от твэлов в активной зоне моделируются процессы теплопередачи в твэлах. По высоте активной зоны выделяется около 20 ячеек (такое количество ячеек определяется математической моделью нейтронной кинетики). В каждой ячейке по высоте интегрируются одномерные уравнения теплопроводности:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = q + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda r \frac{\partial T}{\partial r}).$$

Здесь ρ — плотность, C — теплоемкость, T — температура, λ — термическая проводимость, r — радиус, q — энерговыделение.

Как правило, используется три ячейки на урановую таблетку, две ячейки — на оболочку твэла. В радиальном направлении, как правило, выделяется несколько зон для моделирования режимов с несимметричной работой реактора. Однако некоторые фирмы используют математические модели, в которых определяются средние параметры твэлов в каждой кассете.

Описанные выше модели используются для имитации большинства нормальных и аварийных режимов. В ряде случаев для специальных режимов работы АЭС создаются самостоятельные математические модели. Приведем описание типичной математической модели, которая используется для воспроизведения режимов, связанных с разрывами трубопроводов большого диаметра.

Первый контур разбивается на три объема: 1 — горячие нитки, верхняя камера, активная зона; 2 — холодные нитки, кольцевой зазор, нижняя камера; 3 — компенсатор давления. Объемы 1 и 2 описываются в гомогенном приближении без разделения фаз. Разделение фаз вводится в рассмотрение только в компенсаторе давления. Предполагается одинаковая скорость падения давления в объемах 1 и 2, отличная, однако, от dP/dt в компенсаторе давления, в силу возможного "запирания" потока в дыхательном трубопроводе. Балансовые уравнения массы и энергии для каждого из объемов можно записать в виде

$$P_1 = a_{11} W_1 + a_{12} W_2 + b_1;$$

$$P_2 = a_{21} W_2 + a_{22} \bar{W}_2 + a_{23} W_3 + b_2;$$

$$P_3 = a_{33} W_3 + b_3,$$

где W_1, W_2 — потоки между объемами 1, 2; W_3 — поток через дыхательный трубопровод.

Уравнение импульсов для петель и дыхательной трубки:

$$\left(\frac{L}{S}\right)_1 \frac{dW_1}{dt} + \left(\frac{L}{S}\right)_2 \frac{dW_2}{dt} = \sum_{1,2} (\rho gh) - \sum_{1,2} KW |W| + \Delta P_{PnMp};$$

$$\left(\frac{L}{S}\right)_3 \frac{dW_3}{dt} = (\rho gh) - KW_3 |W_3| + P_3 - P_1.$$

В случае запираания потоков в дыхательной трубке последнее уравнение заменяется на условие $W_3 = W_{кр}(P_3, h_3)$, где $W_{кр}$ — критический расход. Добавляя к выписанным уравнениям условие равенства градиентов давления в объемах 1 и 2, получаем замкнутую систему уравнений относительно неизвестных ($W_1, W_2, W_3, P_1, P_2, P_3$). Система уравнений решается совместно по неявной схеме. Расход распределяется между тремя циркуляционными петлями с учетом расхода в разорванную петлю. Модель учитывает все внешние параметры, обусловленные работой вспомогательных систем и систем безопасности (в уравнениях эти члены опущены для упрощения записи).

Математические модели, основанные на гипотезе глобальной сжимаемости (часто называемой однообъемным приближением) развиты также во ВНИИАЭС. Построенные модели отличаются от методик, описанных выше, используемыми независимыми термодинамическими переменными (P, ρ вместо ρ, h). Следствием является введение дополнительного уравнения сохранения энергии для всего контура в целом вместо уравнения сохранения объемов, которое используется в описанных выше математических моделях. Одна из таких моделей используется в настоящее время во ВНИИАЭС в качестве элемента математического обеспечения функционально-аналитического тренажера. Подчеркнем, что при моделировании достаточно медленных процессов (сюда относятся нормальные режимы эксплуатации и разрыва до ДУ-100 включительно) шаг интегрирования по времени может быть увеличен до 1 с, что позволяет проводить расчеты в несколько раз быстрее реального времени на отечественных ЭВМ.

Методы решения задач моделирования кинетики ядерного реактора. Считаем, что возможны три основных подхода к реализации моделей кинетики ядерных реакторов для тренажеров АЭС: 1) использование точечной кинетики; 2) квазистатическое приближение; 3) непосредственное решение нестационарных уравнений.

Использование точечной кинетики обеспечивает быстроту получения решения, но не позволяет осветить пространственные эффекты изменения поля нейтронов во времени, поэтому модель точечной кинетики

не используется при создании тренажеров для АЭС с реакторами на тепловых нейтронах. Однако отметим, что точечная кинетика обеспечивает достаточную точность получения интегральной мощности, что в сочетании с решением стационарного уравнения переноса нейтронов на границах временных интервалов, т.е. с получением локальных изменений поля нейтронов во времени, дает метод решения (квазистатическое приближение), позволяющий сочетать и быстроту решения и получение пространственных эффектов.

При описании кинетики реактора для тренажеров АЭС используется нестационарное уравнение переноса нейтронов в диффузионном, как правило, одногрупповом приближении (обозначения общепринятые):

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi(\vec{r}, t)}{\partial t} = D \Delta \Phi(\vec{r}, t) - \sum_a \Phi(\vec{r}, t) + (1 - \beta) \gamma_t \sum_i \Phi(\vec{r}, t) + \sum_{j=1}^6 \lambda_j C_j; \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_j(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\lambda_j C_j - \beta_j \gamma_t \sum_i \Phi(\vec{r}, t). \quad (2)$$

Решение этой системы уравнений с соответствующими граничными и начальными условиями возможно получить различными методами. Метод же выбирают исходя из цели решения. При создании нейтронно-физического модуля в рамках тренажера АЭС главной целью является обеспечение получения решения на ЭВМ в режиме реального времени. Трудности получения такого решения обусловлены:

— необходимостью малых шагов интегрирования по времени при решении уравнения (1) из-за $1/v\beta \ll 1$ с;

— учетом шести групп запаздывающих нейтронов;

— большим числом пространственных расчетных точек при решении системы сеточными методами.

Обычно решение системы уравнений (1), (2) представляется в виде

$$\Phi(\vec{r}, t) = T(t) \psi(\vec{r}, t), \quad (3)$$

где $T(t)$ — амплитудная функция; $\psi(\vec{r}, t)$ — вектор формы потока нейтронов, изменяющийся со временем (данное приближение используется в тренажерах АЭС с реакторами типа РБМК и ВВЭР).

В частности, для РБМК предложено решать систему уравнений (1), (2) в квазистатическом приближении, используя приближения “мгновенного скачка”, т.е. предполагая нулевым время жизни мгновенных нейтронов. Стационарное уравнение переноса нейтронов в конечных разностях решается в трехмерной прямоугольной геометрии с числом узлов $12 \times 12 \times 7$ использованием попеременно-треугольного метода (ПТМ).

Использование методов ускорения сходимости и тщательное конструирование начального приближения с целью обеспечения минимума его рассогласования с точным решением позволили получать решение на ЭВМ ЕС-1045 в режиме реального времени. В “критических” ситуациях в данной модели возможен пе-

реход на схему с одной группой запаздывающих нейтронов.

В квазистатическом приближении решается система уравнений (1), (2) и в тренажерной модели легководного реактора *LWR*, где решение системы (1), (2) в трехмерной прямоугольной геометрии представляется в виде

$$\Phi(x, y, z, t) = T(t) t_1(z) t_2(x, y). \quad (4)$$

Использование разделения пространственных переменных позволяет насчитать пробные функции $t_2(x, y)$ заранее, что аналогично применению одноканального метода синтеза поля нейтронов. В основе последнего лежит форма аппроксимации трехмерной функции плотности потока нейтронов в виде

$$\Phi(x, y, z) \cong \sum_{k=1}^K a_k(z) t_{1k}(z) t_{2k}(x, y), \quad (5)$$

где l — номер аксиального слоя Δz_k ; кусочно-непрерывная функция $a_l(z)$ определяет принадлежность плоскостного решения $t_2(x, y)$ к распределению плотности потока нейтронов в аксиальном слое Δz_l .

В простейшем случае

$$a_k(z) = \begin{cases} 1 & z \in \Delta z_k; \\ 0 & z \notin \Delta z_k, \quad k = 1, 2, \dots, K \end{cases} \quad (6)$$

и получаем $\Phi(x, y, z) = t_{1k}(z) t_{2k}(x, y)$ — решение стационарного уравнения переноса нейтронов для получения решений (4). Подставляя (5) в стационарное уравнение и интегрируя его по переменным X, Y , получаем уравнение для $t_1(z)$, решая которое, получают коэффициенты уравнения для функции $T(t)$. При получении $T(t)$ пренебрегают $dT(t)/dt$, тем самым ограничиваясь рассмотрением процессов с $\rho \ll \beta$.

В модели используется так называемое полугрупповое приближение, когда уравнения переноса нейтронов рассматриваются в двух группах, но постулируется отсутствие токов второй группы нейтронов по реактору ($dD_2 \text{ grad } \Phi_2(\vec{r}, t) = 0$ для $\forall \vec{r} \in V$).

Рассматривается пространственное распределение плотности потока нейтронов только первой группы. С учетом указанного предположения $\Phi_2(\vec{r}, t) = A(\vec{r}) \Phi_1(\vec{r}, t)$, где $A(\vec{r})$ — известная функция нейтронных сечений. Однако известно, что на границах сборок и активной зоны возрастает доля воды, что приводит к росту нейтронов нижних групп на этих границах. Правомерность такого подхода покажет только практика.

Точность предполагаемой модели главным образом зависит от подбора пробных функций $t_2(x, y)$. Возможно табулирование значения $t_2(x, y)$ для уместных конфигураций положения стержней СУЗ, а для представления всех возможных конфигураций стержней СУЗ используются аппроксимации $a_l(z)$, отличные от (6).

В квазистатическом приближении предложено решать систему уравнений в модели тренажера ВВЭР ИАТЭ. Решение стационарного уравнения в трехмерной (r, φ, z) геометрии получают, используя процедуру Галеркина, представляя решение в виде

$$\Phi(r, \varphi, z) \cong \sum_{l=1}^L a_l \Psi_l(r, \varphi, z),$$

где a_l — коэффициент разложения по системе координатных функций; предполагается $L = 27$.

В качестве системы координатных функций предлагается использовать произведения собственных функций одномерных операторов диффузии, родственных исходному трехмерному оператору:

$$\Psi_l(r, \varphi, z) = R_i(r) Z_j(z) F_k(\varphi),$$

где $i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K; l = i I(j - 1) + j(k - 1); L = I J K$ принимается $I = J = K = 3$.

Уравнения для одномерных функций получают, используя метод итерационного синтеза. Для определения собственных функций одномерных уравнений используется метод стрельбы, его использование в совокупности с итерационным синтезом позволяет получать решение в режиме реального времени на ЭВМ ЕС-1060. Система уравнений точечной кинетики решается с помощью модификационного метода Эйлера в сочетании с методом прогноза. Прогнозные оценки выполняются для медленно меняющейся концентрации ядер-предшественников запаздывающих нейтронов при допущении о линейном характере изменения $T(t)$ в интервале $(t, t + \Delta t)$ и C_j в интервале $(t - \Delta t, t + \Delta t)$, что имеет место при $\rho \ll \beta$. Это позволяет получать значения $T(t)$ за сотые доли секунды.

Непосредственное решение нестационарных уравнений также используется в тренажерах АЭС. Для быстрого получения решения используют модальные или нодальные методы.

В тренажере некоторых фирм используется нодальный метод, предусматривающий участие в каждой подобласти реактора ("ноде") в решении только одной собственной функции, при определении формфункции из представления решения в форме (3). В данной модели решение для $T(t)$ следует из точечной кинетики, а определение функции следует из определения

$$\Psi_l(t) = \Phi_l(t) / T(t),$$

$$\text{где } \Phi_l(t) = \int_V \Phi_l(\vec{r}, t) d\vec{r}.$$

Результирующее уравнение для Ψ_l в зоне имеет вид

$$\Lambda \left(\frac{\partial \Psi_L(t)}{\partial t} + \Psi_L \frac{\partial \ln T(t)}{\partial t} \right) = (\varphi_{\infty L} - l_L^V - l_L^H - \sum_{M \neq L} C_{iL} - \beta \Psi_L + \sum_{M \neq L} (W_{ML} \Psi_M - W_{LM} \Psi_L)) + \frac{i}{T}. \quad (7)$$

Предполагается, что член $\partial \ln T(t) / \partial t$ может быть оценен из последнего временного шага точечной кинетики. С учетом слабого изменения во времени $\Psi_L(t)$ предполагается

$$\Delta \frac{\partial \Psi_L(t)}{\partial t} \cong \frac{\Delta}{\Delta t} (\Psi_L(t) - \Psi_L(t - \Delta t)),$$

коэффициент уравнения (7) на временном интервале не изменяется, это $\rho_{\infty L}$ — реактивность бесконечного блока из материалов ячейки L ; l_L^V, l_L^H — вероятность утечки из реактора нейтронов, произведенных в зоне L по вертикали и горизонтали соответственно; W_{ML} — вероятность перетечки нейтронов из M в L .

Характеристика токов нейтронов между зонами. Коэффициенты $\rho_{\infty L}, l_L^V, l_L^H, W_{ML}$ определяются при предварительных расчетах по стационарным программам. Полная реактивность реактора определяется как

$$\rho = \sum_L (\rho_{\infty L} - l_L^H - l_L^V) \Psi_L(t) / \sum_L \Psi_L(t).$$

Ограничения по времени позволяют производить расчеты формфункции один раз на двадцати временных интервалах решения задачи точечной кинетики. Точность получаемого решения в данной модели определяется точностью априорных определений коэффициентов уравнения (7).

В тренажере АЭС с реактором ВВЭР, разработанном во ВНИИАЭС НПО "Энергия", для решения системы (1), (2) используют модальный метод с предположением о рассмотрении процессов $\rho \ll \beta$, т.е. в приближении "мгновенного скачка". Искомое решение представляется в виде разложения по собственным функциям $\Psi_L(r, \varphi, z)$ оператора Лапласа, удовлетворяющим соответствующим граничным условиям:

$$\Phi(\vec{r}, t) = \Phi(r, y, t) \cong \sum_{k=1}^K t_k(t) \Psi_k(r, \varphi, z), \quad (8)$$

где Ψ_k — собственные функции, удовлетворяющие уравнению Лапласа: $\Delta \Psi_k + \omega^2 \Psi_k = 0$.

Ряд (8) ограничен десятью членами ($K = 10$), что позволяет получать решение (определить все $t_k(t)$) на временных шагах на ЭВМ в рамках режима реального времени.

Получаемое решение лишь в интегральном смысле аппроксимирует точное решение системы уравнений (1), (2), что характерно для модальных методов. Ограничения на возможность использования данного метода для расчета кинетики реактора с развитой системой управления нейтронным полем связаны с величиной предельно допустимой погрешности моделирования поля нейтронов в реакторе.

В настоящее время во ВНИИАЭС разрабатывается другая модель тренажера ВВЭР, в которой предполагается использовать при решении системы (1), (2) квазистатический метод и метод итерационного синтеза для получения решения в трехмерной прямоугольной геометрии с числом узлов $15 \times 15 \times 15$, т.е. с расчетной

точкой на сборку реактора в плане и с пятнадцатью точками по высоте. Рассматриваются и другие возможные варианты решения системы (1), (2), например использование прямых сеточных методов в квазистатическом приближении, использование собственных функций стационарного оператора переноса нейтронов в модальных алгоритмах и т.д.

Моделирование турбоустановки. Математические модели турбоустановки рассчитывают в реальном времени следующие параметры турбины: давление в отборах; расходы пара через цилиндры турбины, расходы пара в отборы; энтальпии и температуры потока в отборах; полную механическую энергию, вырабатываемую турбиной. Предполагаются заданными следующие основные параметры: входной расход пара; давление; энтальпия; параметры конденсатора, сепараторов-пароперегревателей и т.п. В силу сложности процессов, реализующихся при работе турбины, математические модели существенно используют экспериментальные результаты, полученные в номинальном режиме работы.

Цилиндры турбины разбиваются на зоны, каждая из которых заключена между точками отбора пара. Можно выделить следующие расчетные блоки математической модели: 1 — расчет давлений и расходов итерационным методом, используя стационарные уравнения для потерь давления; 2 — определение энтальпий, предполагая известной мощность ступени как функцию от расхода пара; 3 — вычисления температур с привлечением термодинамических функций. Вспомогательные системы турбины и дополнительные параметры (температура металла, вибрации и т.д.) рассчитываются независимо. Перечислим основное вспомогательное оборудование (часто называемое тепловым), которое включается в состав математического обеспечения тренажеров: сепараторы-пароперегреватели, конденсаторы, подогреватели основного конденсата и питательной воды, паропроводы, управляющие системы. При моделировании теплового оборудования, как правило, предполагается термодинамическое равновесие воды, пара и неконденсирующихся газов.

Приведем основные корреляции, используемые при расчете параметров турбины. Расход $F(I)$ через ступень турбины при падении давления от $P(I)$ до $P(I+1)$ рассчитывается следующим образом:

$$F(I) = F_0(I) \frac{P(I)}{P_0(I)} \sqrt{\frac{(1-S)^2 - P(I+1)/P(I) - S^2}{(1-S)^2 - P_0(I+1)/P_0(I) - S^2}}; \quad (9)$$

$$F(I) = F_0(I) \frac{P(I)}{P_0(I)} \sqrt{\frac{(1-S)^2}{(1-S)^2 - (P_0(I+1)/P_0(I) - S^2)}}. \quad (10)$$

Корреляция (9) используется, если $P(I+1)/P(I) \geq S$, в противном случае используется корреляция (10), где $S = (\frac{2}{\gamma+1})^{\gamma/\gamma-1}$, $F_0(I)$, $P_0(I)$, $P_0(I+1)$ — значения соответствующих параметров в номинальном режиме работы турбоуста-

новки, которые предполагаются известными. В том случае, когда ступень турбины имеет отбор с давлением $P_l(I)$ и расходом $F_l(I)$, принимается следующая зависимость:

$$F(I) = F_0(I) \sqrt{\frac{P(I)^2 - P(I+1)^2}{P_0(I)^2 - P_0(I+1)^2}}$$

Расход в отбор рассчитывается по обычной зависимости:

$$F_l(I) = \frac{1}{Cv} \sqrt{P(I) - P_l(I)},$$

где v — удельный объем пара, C — известный коэффициент, учитывающий положение клапана.

Изменение энтальпии при прохождении через ступень турбины определяется из следующего уравнения:

$$h(I) - h(I+1) = CF dh_0(I);$$

$$CF = \frac{F(I)}{F_0(I)} / 2 - \frac{F_l(I)}{F_0(I)}.$$

Здесь, как и ранее, dh_0 — изменение энтальпии в номинальном режиме работы турбоустановки.

Полная механическая энергия, генерируемая турбиной, вычисляется суммированием произведений расходов на соответствующие перепады энтальпий.

Приведенное выше описание показывает, что математическое описание турбоустановки, применяемое для построения тренажеров, основано на использовании экспериментальных данных и полуэмпирических зависимостей.

Ранее отмечалось, что моделирование конденсатора, деаэратора, подогревателей и т.д. основано на предположении термодинамического равновесия пара, воды и воздуха. Перечислим ряд специальных усовершенствований, которые в ряде случаев вводятся в рассмотрение: 1) уменьшение коэффициента теплоотдачи при повышении содержания воздуха (конденсатора или подогревателей); 2) учет массы охлажденной воды в силу большой емкости соответствующих трубопроводов; 3) учет эффектов транспортного запаздывания температуры в трубопроводах теплового оборудования.

Моделирование вспомогательных систем. Значительная часть оборудования, которое необходимо моделировать при создании математического обеспечения тренажеров, не требует сложных моделей. Однако большой объем оборудования делает задачу моделирования таких систем очень трудоемкой. Поэтому большинство фирм — разработчиков математического обеспечения тренажеров при создании моделей использует специальные пакеты автоматизации программирования моделей гидравлических систем, электрических систем, систем автоматических регуляторов. Пакеты пригодны для использования технологами, не имеющими высокой квалификации в области программирования.

Исходной информацией является топология гидравлической сетки, положение задвижек, насосов, сосудов с уровнями, теплообменников и т.д.

Пакет проводит анализ структуры гидравлической сети и выявляет автономные подсистемы, которые слабо связаны с другими частями сети и могут моделироваться независимо. В состав пакета входит библиотека стандартных программ, содержащая модели всех возможных элементов гидравлической сети. Основными уравнениями, описывающими гидравлическую сеть, являются уравнения теплообмена, сохранения массы и энергии. Конечно-разностная аппроксимация этих уравнений приводит к системе нелинейных алгебраических уравнений большей размерности, которая решается итерационными методами с использованием техники работы с разреженными матрицами. В результате работы пакета получается математическая модель гидравлической системы, готовая к использованию в составе математического обеспечения тренажера.

Использование современной технологии разработки тренажеров (включая пакеты автоматизации программирования) и эффективных методов математического моделирования позволяет существенно повысить эффективность работы инженеров-программистов и качество создаваемых тренажеров. Современные тренажеры часто пригодны не только для обучения персонала, а также для исследования аварийных режимов, оптимизации регламента, настроек регуляторов и использования в других областях атомной техники.

Статья поступила в редакцию
25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер.
Физика и техника ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 10—17.

МНОГОЦЕЛЕВЫЕ МОДЕЛИРУЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ — ОСНОВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ, ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЯЭУ

С.Д. Малкин, И.Д. Ракитин, В.П. Сивоконь, В.В. Шалы

Рассматриваются методические и систематические особенности разрабатываемых в ИАЭ им. И.В. Курчатова многоцелевых модулирующих комплексов и основные области их применения — в научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях, в надзорно-регулирующих органах, а также непосредственно на АЭС в качестве анализаторов аварийных ситуаций и “нетрадиционных” тренажеров.

MULTIPURPOSE MODELLING COMPLEXES — A BASIS FOR INVESTIGATING HEAVY ACCIDENTS, DESIGNING AND IMPROVING CONTROL SYSTEMS OF NPP. S.D. MALKIN, I.D. RAKITIN, V.P. SIVOKON, V.V. SHALYA. Methodical and systematic peculiarities of multipurpose modelling complexes developed in I.V. Kurchatov Atomic Energy Institute and their basic fields of application such as R&D and design organizations, supervision and control agencies as well as directly at NPP as accident condition analysers and “non-traditional” simulators are considered.

В последние годы как в нашей стране, так и за рубежом отчетливо просматривается тенденция разработки и внедрения в проектно-конструкторских, научно-исследовательских организациях, а также на АЭС моделирующих устройств, сочетающих в себе возможности моделирующих комплексов, тренажеров, анализаторов аварийных ситуаций и советчиков (“прогнозаторов” процесса) для помощи оперативному персоналу. Предпосылками для этого являются:

- разработка эффективных математических моделей процессов, происходящих в энергоблоке, совместно с моделями действий автоматики, защит и оперативного персонала по ручному регулированию;

- появление на рынке доступных пользователю высокопроизводительных и компактных средств вычислительной техники (т.н. супермикроЭВМ, оснащенных адекватным общим математическим обеспечением и соответствующими средствами активного взаимодействия “человек-машина”), позволяющих реализовать достаточно сложные математические модели в “реальном” и даже в “ускоренном” масштабе времени;

- оснащение энергоблоков информационно-вычислительными системами цифрового сбора и обработки информации со средствами организации оперативного двустороннего обмена информацией с моделирующим комплексом;

- накопление коллективного опыта по поведению технологических процессов и действиям оперативного персонала в сложных аномальных ситуациях и предоставление возможности эффективного аккумулирования и использования этого опыта в виде экспертной системы.

Например, на всех французских АЭС нового поколения в пультовой организуется специальное рабочее место (“панель безопасности”), оснащенное дисплейными средствами отображения информации и связанное со “своим” моделирующим вычислительным комплексом, а также с АСУ ТП блока [1, 2], на ряде АЭС Скандинавских стран и Нидерландов в пультовой устанавливаются компактные “симуляторы” — т.е.

имитаторы-тренажеры, а также подключенные к АСУ ТП, и т.д.

Наконец, все ведущие западные фирмы разработку, отладку и модернизацию АСУ ТП АЭС обязательно проводят с использованием моделирующего комплекса, имитирующего особенности поведения объекта в нормальных эксплуатационных и в наиболее сложных, в том числе аварийных, режимах, особенно тех, когда может возникнуть ситуация “переполнения” информационных потоков [3].

Определенный опыт разработки и применения моделирующих комплексов нетрадиционных тренажеров накоплен и в нашей стране, главным образом для установок специального назначения [4, 5]. Представляется целесообразным рассмотрение этого опыта применительно к мощным энергетическим реакторам, в частности к энергоблоку типа РБМК.

Создание математических моделей и проведение на них вычислительных экспериментов позволяет существенно повысить понимание сложных процессов, характерных для поведения энергоблоков как в режиме нормальной эксплуатации, так и для аномальных и аварийных условий.

Особую роль при исследованиях тяжелых аварий и при решении проблемы обеспечения устойчивой работы ядерных энергоблоков могут играть их комплексные всережимные математические модели. Их использование позволило бы проводить “сквозной” анализ тяжелых аварий: от возникновения исходного события до получения конечных результатов разрушений и воздействия на окружающую среду. Это дало бы возможность не только исследовать причины и анализировать версии уже случившихся аварий, но и вести активный целенаправленный поиск возможностей возникновения тяжелых аварий, не предусмотренных в проектных обоснованиях. Важность такого направления исследований заключается в том, что оно могло бы позволить проявить “проницательность” и выявить первопричины многих аварий не после, а до того, как они могли бы произойти. Очевидно, что такие возможности помогли бы предотвратить или локализовать

практически все обнаруженные таким способом аварии.

Создание комплексных всережимных математических моделей ядерных энергоблоков в сочетании с математическими моделями динамики окружающей среды должны позволить решить одну из сложнейших проблем управления операциями при тяжелых авариях, включая оперативную разработку мер по защите персонала и населения, вплоть до разработки маршрутов эвакуации людей с учетом изменения текущей радиационной обстановки.

Комплексные математические модели незаменимы для определения настроечных параметров многочисленных взаимосвязанных через технологические процессы регуляторов, блокировок и защит. Настроить эти параметры непосредственно на работающем энергоблоке часто не представляется возможным, и это приводит к возникновению неустойчивости и неоправданному срабатыванию защит и блокировок. А это, в свою очередь, влечет за собой снижение коэффициента использования мощности ядерного энергоблока и может повлиять на устойчивость работы энергосистемы в целом.

Однако решение этих проблем зависит не только от качества и возможностей комплексных всережимных математических моделей, но и от технических средств их реализации, т.е. прежде всего от характеристик вычислительной системы, которая будет использоваться при моделировании и анализе тяжелых аварий.

Важность человека-оператора в обеспечении безопасности и эффективности АЭС предопределяет требования к его системам информационной поддержки. На оперативном персонале лежит вся ответственность за безопасную эксплуатацию АЭС. Ошибки оперативного персонала чрезвычайно дороги: об этом свидетельствуют аварии на ТМ1 в США и на ЧАЭС в СССР. Эти аварии заставили изменить порядок следования целей оперативного сопровождения. Если раньше на первом месте была эффективность работы АЭС при условии обеспечения ее безопасности, то теперь на первое место поставлена безопасность, а затем уже эффективность работы АЭС. И это понятно: ведь сейчас ситуация такова, что еще одна тяжелая авария на АЭС, независимо от того, в какой стране она произойдет, может оказаться трагической не только для развития, но и для самого существования атомной энергетики.

Таким образом, первой и наиболее важной целью подготовки и информационной поддержки оперативного персонала должно быть обеспечение безопасной эксплуатации АЭС во всех, в том числе непредвиденных, условиях и локализация аварийных ситуаций, если авария все же произошла. В плане обучения эту цель невозможно достичь без использования полномасштабных тренажеров АЭС. Однако удовлетворяют ли современные полномасштабные тренажеры АЭС требованиям, которые необходимы для достижения указанной цели?

К сожалению, ни один из созданных в мире полномасштабных тренажеров АЭС не удовлетворяет

этим требованиям, т.к. они не используют всережимные математические модели, способные воспроизводить тяжелые запроектные аварии и обеспечить отработку навыков не только в процессе возникновения таких аварий, но и в послеварийный период.

Уже одного этого достаточно, чтобы ставить вопрос о целесообразности создания полномасштабных тренажеров АЭС нового поколения. Однако этим дело не ограничивается. Так, например, заказчик и будущий пользователь полномасштабного тренажера для Ленинградской атомной электростанции (ЛАЭС) сформулировал технические требования, в соответствии с которыми тренажер должен обеспечивать многофункциональный режим работы:

— режим подготовки и тренировки операторов энергоблока;

— режим подготовки и тренировки инструкторов;

— исследовательский режим, включающий непосредственную аппаратную связь с реальным энергоблоком;

— режим психофизиологических исследований;

— режим подготовки и тренировки административного персонала АЭС и технического персонала учебного центра.

Нетрудно видеть, что эти требования в сочетании с требованиями воспроизведения запроектных аварий приводят к тому, что новый тренажер должен объединять в себе возможности полномасштабных тренажеров и моделирующих комплексов (анализаторов аварийных ситуаций). Такой тренажер можно назвать перспективным полномасштабным инженерным тренажером (ПИТ). Успешная разработка и создание этого тренажера послужит стимулом для усовершенствования полномасштабных тренажеров для АЭС во всем мире.

Создание перспективного ПИТ для ЛАЭС осложняется еще и тем, что в составе энергоблока находится реактор РБМК (реактор "чернобыльского" типа), который, безусловно, является наиболее сложным реактором для АЭС в мире.

Представляется целесообразным, используя основные принципы и функционально-алгоритмическую структуру построения моделей для ПИТ, разработать его "упрощенный вариант" для использования в качестве моделирующего комплекса-анализатора безопасности атомных станций (АБАС).

В ИАЭ им. И.В. Курчатова начата разработка такого специализированного комплекса. Он должен обеспечить функционирование в двух режимах.

1. Режим функционирования в составе комплексного стенда для разработчиков систем контроля, управления и информационно-вычислительной системы. В этом режиме комплекс должен предоставлять возможности подключения к реальной аппаратуре штатных систем (или их макетов), воспроизводить основные процессы, протекающие в ЯЭУ, и генерировать соответствующие потоки информации, поступающие на эти системы и приходящие от них. Работа в данном режиме позволит проводить отладку, модернизацию или замену систем в максимально приближенных к

реальным информационных условиях. При этом система настройки АБАС должна обеспечить имитацию аномальных режимов в "реальном" времени или максимально приближающемся к таковому.

2. Режим функционирования на объекте (Курская АЭС). При этом АБАС должен размещаться в помещении БЩУ таким образом, чтобы была обеспечена его связь с информационно-вычислительной системой "Скала-микро", а дисплейный пульт комплекса должен быть доступен оперативно-диспетчерскому персоналу БЩУ, руководству смены и персоналу НИО.

В этом режиме функционирования исходная модель ЯЭУ непрерывно обновляется в соответствии с реальной информацией об объекте.

При этом планируется обеспечить возможности "ускоренного" проигрывания будущих состояний объекта (прогнозирование), анализа неисправностей в технологических системах, прогноза будущих и анализа прошедших аварийных ситуаций, понятной и концептуальной адаптации оперативного персонала к текущей обстановке после перерывов в работе и т.д.

В настоящее время в ИАЭ им. И.В. Курчатова разрабатываются моделирующие комплексы различного назначения. В этих моделирующих комплексах используются математические модели различной степени сложности: от интегральных (балансовых) до моделей, описывающих нестационарные пространственные процессы.

Однако наиболее сложной является проблема создания многоцелевого моделирующего комплекса, предназначенного для решения следующих основных проблем:

- поиск возможностей возникновения запроектных аварий с учетом человеческого фактора и диверсий;

- обобщение опыта аварийных ситуаций и использование полученной информации для анализа достоверности комплексных всережимных математических моделей;

- исследование новых способов предотвращения и локализации аварийных ситуаций, включая создание и практическую отработку технических и программных средств поддержки операторов при работе в аварийных условиях;

- проведение оперативного анализа причин случившихся аварий и прогнозирование развития дальнейших событий;

- разработка предложений по локализации реально случившихся аварий, рекомендаций по действиям аварийных групп и мерам по ликвидации последствий этих аварий, включая определение необходимости и выбор маршрутов для эвакуации населения.

Естественно, такой моделирующий комплекс может быть использован для анализа технических решений по усовершенствованию алгоритмов управления и защиты, включая экспериментальную отработку улучшенных пультов управления и инструкций по управлению энергоблоками, для определения диапазонов и значений настроечных параметров регуляторов,

блокировок и защит, а также для апробации новых технических решений по изменению технологических схем и модификации или замене оборудования и систем АЭС. Весьма важным является также, что такой моделирующий комплекс обеспечит возможность наглядного комплексного изучения и понимания глобальных процессов, протекающих в ядерных энергоблоках, и для инженеров-исследователей, и для конструкторов, и для эксплуатационников.

Многоцелевой моделирующий комплекс такой высокой степени сложности должен представлять собой высокоскоростную специализированную вычислительную систему, соединенную с рабочими станциями исследователей и аналитиков на базе супермикроЭВМ с графическими системами отображения информации. На этой системе будут реализованы математические модели, с различной степенью подробности описывающие динамику ядерных энергоблоков. Наиболее жесткие требования к производительности и памяти вычислительной системы предъявляют комплексные всережимные математические модели ядерных энергоблоков в целом, которые должны удовлетворять принципам функциональной полноты и достаточной точности для анализа практически любых аварийных ситуаций, в том числе тяжелых аварий.

Для удобства управления комплексными всережимными математическими моделями многоцелевой моделирующий комплекс должен иметь функции, присущие полномасштабным тренажерам, например такие, как:

- "фотографирование";

- прямая и обратная "прокрутка";

- регистрация параметров и управляющих сигналов;

- "замораживание" и ряд других.

В то же время многоцелевой моделирующий комплекс должен обладать и свойствами, отличающими его от тренажеров. Это, во-первых, более высокая точность математического моделирования и, во-вторых, наличие системы автоматизации моделирования, позволяющей обеспечить быструю и эффективную модификацию и развитие математических моделей.

Кроме того, многоцелевой моделирующий комплекс должен обеспечивать возможность подключения реальной аппаратуры управления, например такой, как аппаратура системы поддержки операторов в аварийных условиях. Очевидно, что непосредственно на АЭС проверить правильность функционирования такого рода систем невозможно, а без их проверки внедрять их в эксплуатацию недопустимо. Только моделирующий комплекс дает возможность с максимальной доступной полнотой испытать такие системы с учетом особенностей человека-оператора. Особенности использования моделирующих комплексов делают их практически несовместимыми с вычислительными центрами общего пользования, что следует из приведенной ниже таблицы.

НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ ОТЛИЧИЯ МОДЕЛИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ОТ ТРЕНАЖЕРОВ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ

Отличия от ТРЕНАЖЕРОВ	Отличия от ВЦ
Более точные и гибкие математические модели	Режимы жесткого реального времени
Использование дисплейных пультов управления	Специализированная вычислительная система
Применение для исследований и разработок энергоблоков	Специализированные средства управления моделями
Исследования взаимодействия человек—машина	Система обмена информацией с аппаратурой управления
Испытания реальной аппаратуры управления	Монопольные режимы работы

В последнее время значительное внимание уделяется также проблемам организации, функционирования и поддержки специальных противоаварийных служб и центров.

Важная роль в проблеме создания технических средств поддержки аварийных групп принадлежит разработке мобильных (возимых) моделирующих комплексов со всережимными математическими моделями для быстрого развертывания на месте аварии или вблизи от него. Такие мобильные комплексы должны быть связаны с Центрами поддержки аварийных групп (возможно, региональными), обеспечивая оперативное руководство и принятие обоснованных решений на месте происшествия.

Особое значение при разработке технических средств поддержки аварийных групп имеет подсистема прогноза возможных последствий аварии на местности. Эта подсистема, которая должна войти в состав многоцелевого моделирующего комплекса, предназначена для разработки мер по защите населения в случае аварии путем взаимоувязывания оценки риска, социальных и экономических последствий с затратами и критериями безопасности, а также для подготовки, переподготовки и отработки навыков действий персонала атомных станций и аварийных групп при авариях на АЭС.

В настоящее время в НПО "Тайфун" и в ряде других организаций разработаны методики расчета радиационных последствий на местности с учетом данных по метеоусловиям, распределению плотности населения, физико-химическим свойствам нуклидов и параметрам аварийных выбросов. Разработана также методика расчета генетических и соматических эффектов облучения на базе современных отечественных и зарубежных достижений в этой области. На реальной информации апробирован пакет прикладных программ, предназначенный для многовариантных экспрессных оценок структуры и значений радиационных последствий на местности в результате возможных аварийных выбросов АЭС в атмосферу. Организация

расчетов по указанному пакету позволяет просто и оперативно сформулировать желаемое расчетное подпространство многомерной зависимости радиационных последствий от множества параметров и представлять выходной массив значений в удобном для пользователя виде. Все эти программы планируется включить в состав многоцелевого моделирующего комплекса.

Достаточно очевидно, что многоцелевой моделирующий комплекс, представляющий собой мощную программно-аппаратную систему для анализа аварийных ситуаций на ядерных энергоблоках, может стать технической базой Центра поддержки аварийных групп, основными задачами которого являются:

- а) при поступлении информации об аварии:
 - оперативный анализ причин аварий;
 - прогнозирование развития дальнейших событий;
 - рекомендации по локализации аварии и действиям аварийных групп;
 - анализ мер по ликвидации последствий аварии, включая определение необходимости и выбор маршрутов для эвакуации населения;
- в) в периоды между авариями:
 - поиск возможностей возникновения запроектных аварий с учетом человеческого фактора и диверсий;
 - обобщение опыта аварийных ситуаций и использование полученной информации для анализа достоверности комплексных всережимных математических моделей;
 - исследование новых способов предотвращения и локализации аварийных ситуаций.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Константинов Л.В., Ракитин И.Д. Методы и средства совершенствования взаимодействия человек—машина при управлении АЭС//Атомная техника за рубежом. 1984. № 9. С. 3—16.
2. Computer based aids for operator support in Nuclear Power Plants//IAEA-Тecdoc-549. Vienna, 1990.
3. Проект систем контроля и управления для реактора с водой под давлением. Предложения по советско-французскому сотрудничеству. Фирма "Мэрлен Жерен". № 7319052 А. 1989.
4. Малкин С.Д. Концепции и проблемы автоматизации АЭС: Препринт/ИАЭ им. И.В. Курчатова. № 4835/4. М., 1989.
5. Малкин С.Д. Основные особенности тренажеров для АЭС: Препринт/ИАЭ им. И.В. Курчатова. № 4834/4. М., 1989.

Статья поступила в редакцию

25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 18—21.

ВЕРИФИКАЦИЯ СЛОЖНЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

А.Г. Маркитан, В.М. Панин, Л.Н. Подлазов

Описывается методика верификации сложных нейтронно-физических программ, основанная на использовании экспериментальных данных.

VERIFYING COMPLEX PROGRAM COMPLEXES FOR CALCULATING POWER REACTOR DYNAMICS BASED ON EXPERIMENTAL DATA. A.G. MARKITAN, V.M. PANIN, L.N. PODLAZOV. Methods of verifying complex neutron-physical programs based on using experimental data are described.

В настоящее время компьютерные программы широко используются для оценки безопасности АЭС. В связи с этим возникает вопрос о достоверности предсказания по этим программам поведения энергетических установок при нормальных и аварийных режимах.

Верификация сложных программных комплексов, описывающих совокупность пространственно-распределенных нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в реакторе, является сложной проблемой, требующей системного подхода. Обычно тестирование сложных программ идет по двум взаимосвязанным направлениям:

- расчетно-экспериментальная проверка качества описания отдельных физических процессов;
- верификация программных комплексов на основе интегральных экспериментальных данных, полученных как на специальных стендах, так и на реакторных установках.

В рамках первого направления идет процесс уточнения математических моделей физических процессов по мере накопления новых знаний и пополнения базы данных исследуемых явлений. Сложные программные комплексы строятся на основе вышеназванных моделей, уже прошедших расчетно-экспериментальную проверку.

Известно, что страны, входящие в Агентство по ядерной энергии OECD, разработали метод повышения доверия к результатам прогнозных расчетов, полученных по компьютерным программам, путем реализации программы Международных Стандартных Задач (ISP). Большинство таких задач включает теплогидравлические расчеты тестов, моделирующих переходные процессы на АЭС. Некоторые включают также расчеты характеристик контеймента как при основных проектных авариях, так с недавних пор и при взаимодействии расплавленной зоны с бетоном и другими элементами конструкции реактора во время тяжелых аварий [1]. Вместе с тем согласно известным нам данным методология тестирования программ, совместно описывающих пространственные нейтронно-теплогидравлические процессы при аварийных ситуациях, разработана недостаточно. Поэтому весьма

полезным, считаем, явилось бы создание банка тестов, проверяющих подобные программные комплексы. В данной работе на одном из примеров обсуждается подход к тестированию сложных нейтронно-физических программ и связанные с этим проблемы.

Подход к тестированию. В СССР одновременно с созданием программ, реализующих одно-, двух- и трехмерные динамические модели, начали проводиться работы по их верификации и соответственно разработке методик и программ проведения экспериментальных исследований на реакторах. Однако эти исследования в основном были направлены на расчетно-экспериментальный анализ пространственно-динамических характеристик, связанных с поведением низших гармоник энергораспределения. Типичные примеры таких исследований приведены в работах [2, 3].

Вместе с тем повышению требований к обоснованию безопасности, и в частности введение в перечень проектных аварий таких режимов, как самопроизвольное извлечение стержней СУЗ ("самоходы"), потребовало оценок точности результатов, полученных с помощью пространственно-распределенных моделей, при расчетах значительных локальных деформаций полей. Эта проблема в силу специфики возникающих в реакторе процессов была выделена в особую задачу, под которую проводилась серия экспериментов на действующих энергетических реакторах.

В данной работе на примере двумерной динамической программы "RADA" рассмотрены основные проблемы ее тестирования, направленного на выявление возможностей моделирования по этой программе режима "самохода" стержня СУЗ. Модель, реализованная в программе "RADA", основана на описании динамики радиально-азимутального поля в однополовом модифицированном диффузионном приближении, в предположении, что локальный коэффициент размножения нейтронов является функцией температур топлива и замедлителя, объемного паросодержания и концентрации ксенона. Кроме этого моделировалась также работа системы управления и защиты. Уравнение диффузии расписывалось по пространству в конечных разностях по пятиточечной схеме с исполь-

зованием 540 узлов. Применительно к РБМК каждый расчетный узел объединяет 4 технических канала.

Принятая методика тестирования включала в себя следующие фазы. По зарегистрированной перед опытами информации проводилось усреднение мощностей и расходов через ТК по выбранной ячейке 2 x 2 технологических каналов. Полученные таким образом данные вводились в программу "RADA" в качестве начального распределения нейтронных полей и расходов, куда также закладывалась и информация об исходном положении органов регулирования и значения теплотехнических параметров. Затем с помощью программы воспроизводился экспериментальный режим. Мерой точности при тестировании служила информация об отклонениях в поведении расчетных параметров от экспериментально зарегистрированных. Однако такой анализ нельзя считать полным, если не учитывать чувствительность результатов расчетов к возможным ошибкам измерений и исходных данных. Поэтому перед тестированием программы необходимо было провести работу, связанную с оценкой влияния ошибок в задании исходных данных на результаты проводимых расчетов и выявлением параметров, для которых ошибки в задании исходных значений будут приводить к большим отклонениям в результатах расчетов. Определение таких параметров позволяет также установить, какие из них требуется задавать с максимальной достижимой точностью и какие могут быть заданы весьма приближенно для получения удовлетворительных результатов тестирования.

Проведенные исследования для режимов "самостоя" стержней СУЗ показали, что наиболее сильное влияние на расчет оказывают погрешности в задании веса перемещаемого стержня, исходного нейтронного потока и площади миграции в ячейке, где он перемещается. Коэффициент усиления относительной ошибки для этих случаев лежит в пределах $1,5 \div 2,5$. Ошибки в задании других параметров активной зоны, и в частности коэффициентов реактивности, оказывают более слабое влияние на результаты расчетов.

Краткое описание экспериментов и результатов тестирования. На втором блоке Смоленской АЭС в апреле 1989 г. на 50% уровне мощности были проведены три серии опытов, в каждом из которых производилось перемещение одного заранее выбранного стержня ручного регулирования (РР). В работе при этом находилась штатная двенадцатизонная система локальных автоматических регуляторов (ЛАР), размещение стержней и датчиков которой приведено на рис. 1.

В первой серии опытов при одной отключенной зоне ЛАР с координатой 32—31 первоначально было проведено ступенчатое извлечение стержня РР с координатой 34—27 (см. рис. 1) с глубины 6,5 м до 1 м. Затем этот стержень был погружен на глубину 6,6 м и после небольшой выдержки (~ 30 мин) было осуществлено его непрерывное извлечение до 1,4 м. На протяжении всего опыта был зафиксирован непрерывный сигнал штатного безынерционного датчика с ко-

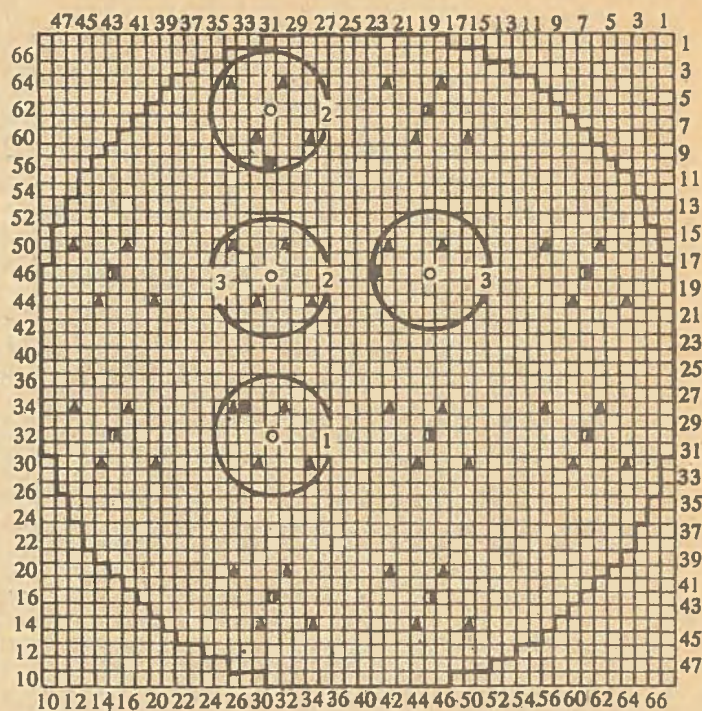


Рис. 1. Картограмма расположения стержней и датчиков:

- — стержень ЛАР; ● — стержень РР; ▲ — датчики ЛАР;
- — отключенная зона ЛАР в первом опыте

ординатой 34—26 (см. рис. 1), принадлежащего отключенной зоне ЛАР. Опыт продолжался 160 мин.

Во второй серии опытов были отключены уже две зоны ЛАР с координатами 46—31 и 62—31 и проводилось ступенчатое извлечение стержня 56—31 с глубины 6,8 м до 5 м. Фиксировался сигнал штатного датчика, имеющего координаты 60—30 и находящегося на расстоянии 2,24 шага решетки от извлекаемого стержня. Продолжительность опыта равнялась 65 мин.

Третья серия опытов была проведена через 35 мин после окончания второй серии. За это время в работу была введена зона ЛАР с координатой 62—31 и выведена зона с координатой 46—45, таким образом, перед третьей серией в двенадцатизонной системе ЛАР работало также две зоны (см. рис. 1). Опыт состоял в ступенчатом извлечении стержня РР с координатой 46—41 с глубины 6,7 м до 1 м. Фиксировался сигнал штатного датчика, имеющего координату 44—44 и находящегося на расстоянии 3,61 шага решетки от извлекаемого стержня. Опыт длился 123 мин.

Все описанные серии опытов были воспроизведены с помощью программы "RADA", в которой в полном соответствии со штатной системой моделировалась и логика работы системы ЛАР. Результаты расчета и эксперимента в относительных единицах по изменению локальной мощности в ячейке представлены на рис. 2, 3, из которых следует, что программа достаточно хорошо воспроизводит режим извлечения стержня РР. Максимальная абсолютная ошибка не превосходит 8%.

Из рисунков также следует, что в модели корректно описана динамика обратных связей по температуре графита и концентрации ксенона. Об этом свидетельствует то, что скорость изменения поля после каждого ступенчатого извлечения стержня для расчета и эксперимента практически совпадает. Рост мощности для всех таких случаев обусловлен увеличением температуры графита и уменьшением концентрации ксенона.

Пространственный вид абсолютного отклонения радиально-азимутального поля энергораспределения от исходного на момент окончания каждой серии опытов изображен на рис. 2, 3, где виден не только пикообразный всплеск мощности в районе извлекаемого стержня РР, но и хорошо различимы места погружения стержней системы ЛАР, отрабатывающей вносимое возмущение.

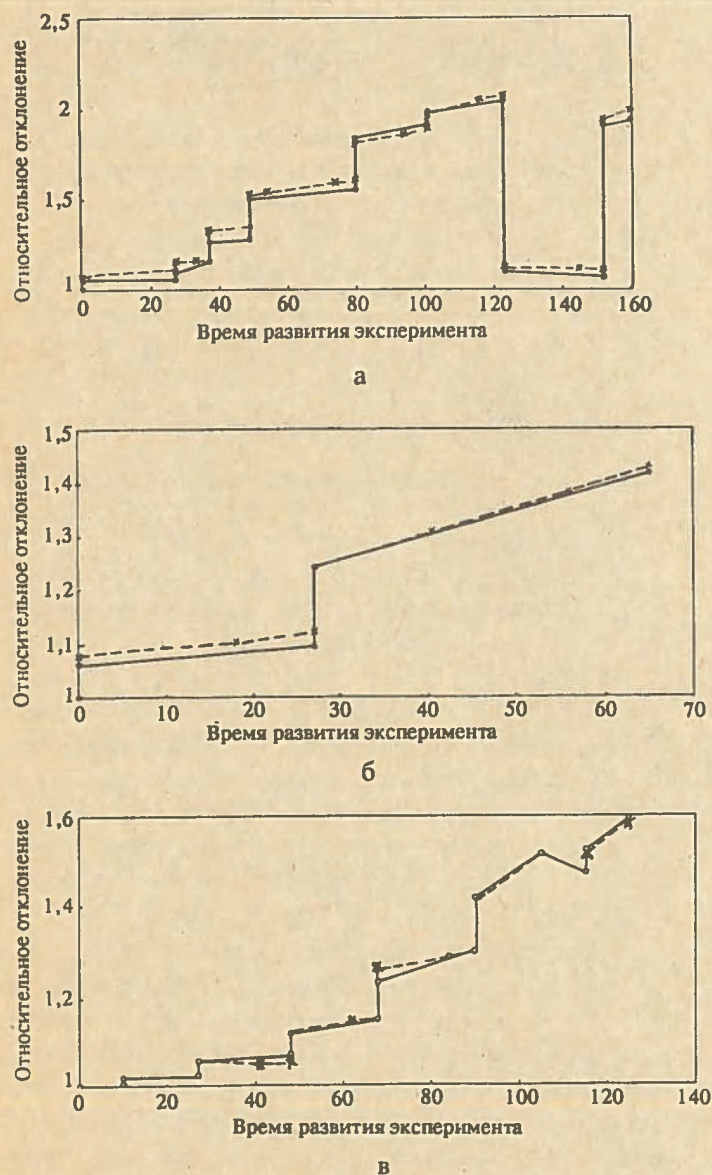


Рис. 2. Сравнение экспериментальных данных первого (а), второго (б) и третьего (в) опытов и результатов расчета: \times — эксперимент; $-\cdot-$ — расчет

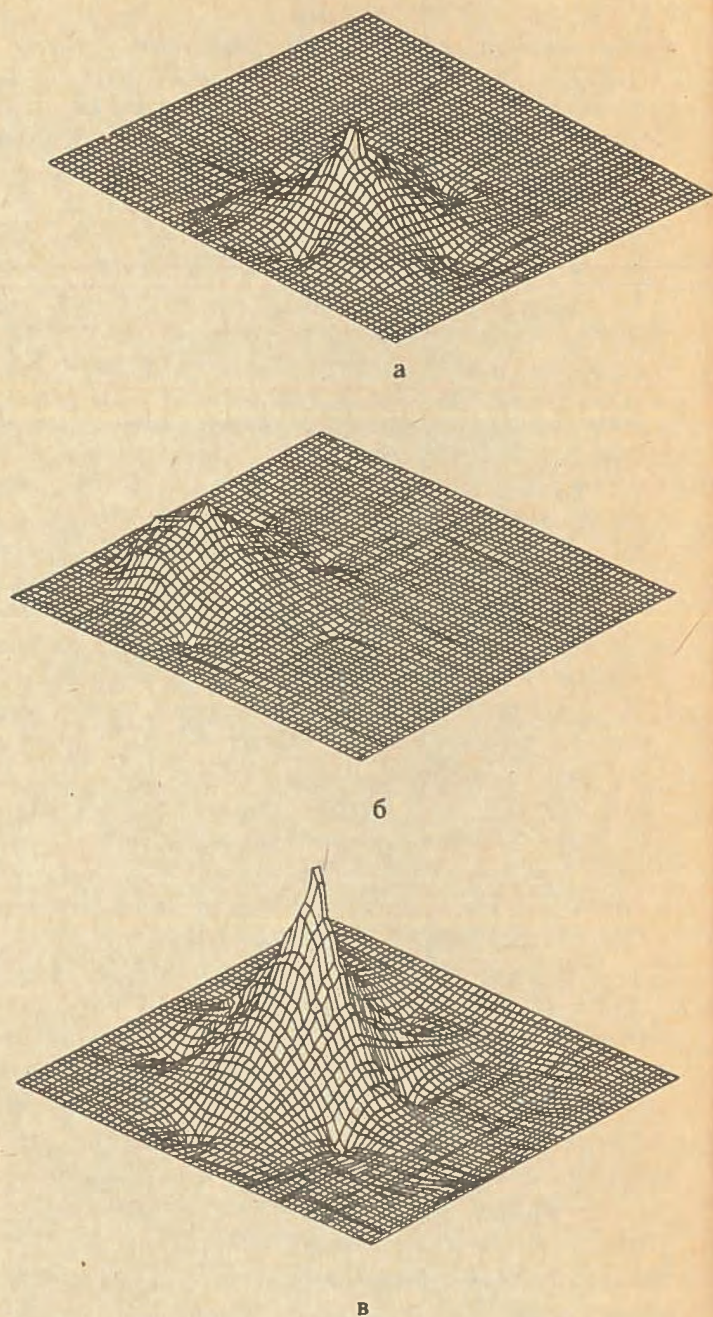


Рис. 3. Деформация радиально-азимутального поля в первом (а), втором (б) и третьем (в) опытах

Заключение. Опыт тестирования моделей и программ для расчетов пространственно-распределенных нейтронно-теплогидравлических процессов в реакторах показывает, что необходимо иметь достаточно широкий набор экспериментальных данных для различных типов переходных процессов, характеризующихся той или иной степенью возбуждения низших и высших пространственных гармоник. При этом необходимым этапом тестирования программ является анализ чувствительности результатов расчета исследуемого типа режимов к погрешностям исходных данных и закладываемых в модель физических характеристик для выявления тех наиболее значимых параметров, ошибки в задании которых будут приводить к большим отклонениям расчетных данных от экспе-

риментальных. Это позволяет, с одной стороны, попытаться добиться максимально возможной точности исходной информации об этих модельных параметрах, а с другой стороны, в процессе тестирования попытаться уточнить эти параметры, воспользовавшись каким-либо из известных методов идентификации. Если в процессе идентификации какой-либо параметр выходит за пределы доверительного интервала, то это может служить признаком некорректности математической модели.

При проведении прогнозных расчетов безопасности по оттестированным методикам и программам должны учитываться возможные погрешности наиболее значимых параметров при формировании исходных данных. Для оценки погрешности в этом случае необходимо использовать методы статистического моделирования.

В данной работе было получено, что воспроизведение режима "самохода" стержня СУЗ по двумерной программе типа "RADA" требует большой тщательности при подготовке исходных данных по изменению локальных коэффициентов размножения и M^2 , а так-

же локальному распределению мощности вблизи извлекаемого стержня.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Карузо Р., Хикен Е. Международные стандартные задачи // Международная конференция по безопасности тепловых реакторов. Авиньон. Франция, 2—7 октября 1988.
2. Алексаков А.Н. и др. О деформации поля энерговыделения в РБМК // Атомная энергия. 1979. Т. 46. Вып. 4. С. 227.
3. Емельянов И. и др. Автоматическая система управления распределением мощности в энергетическом реакторе // Атомная энергия. 1980. Т. 49. Вып. 6. С. 357.

Статья поступила в редакцию
25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер.
Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 22—25.

УДК 621.039

О ВЛИЯНИИ СТЕПЕНИ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВА НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ НЕЙТРОННЫХ ПОЛЕЙ РЕАКТОРА РБМК

А.И. Ионов, Л.Н. Подлазов, В.Д. Рогова

Приводятся результаты моделирования динамики объемных нейтронных полей реактора РБМК.

INFLUENCE OF THE SPACE DISCRETIZATION DEGREE ON THE RESULTS OF DESIGN MODELLING THE DYNAMICS OF NEUTRON FIELDS OF RBMK REACTOR. A.I. IONOV, L.N. PODLAZOV, V.D. ROGOVA. Results of modelling dynamics of volume neutron fields of RBMK reactor are proposed.

Современные энергетические реакторы мощных блоков АЭС по совокупности характеристик и свойств можно отнести к классу реакторов больших физических размеров, для которых пространственно-распределенные процессы при анализе безопасности во многих случаях играют решающую роль.

Особенности динамики этих реакторов таковы, что даже при сохранении среднего по объему активной зоны потока нейтронов локальные "перекосы" мощности могут привести к тяжелым последствиям, если не предусмотрены специальные меры контроля, управления и аварийной защиты.

Очевидно, что выявление и анализ всех существенных особенностей пространственной динамики и разработка соответствующих мер обеспечения безопасности немислимы без использования трехмерных динамических программ.

Наиболее яркой иллюстрацией того, что без использования достаточно подробных пространственных трехмерных динамических моделей реактора невозможно ни понять, ни осмыслить развитие аварии, являются исследования аварийного процесса на четвертом блоке ЧАЭС.

Практический опыт анализа условий безопасности по трехмерным моделям реакторов, характеризующихся значительной неоднородностью нейтронно-физических свойств в объеме реактора, положительными и отрицательными обратными связями с различной инерционностью, показывает, что некорректно выбранный шаг пространственной сетки может привести не только к существенным ошибкам, но и к качественно неправильным результатам.

Поскольку строго аналитически не представляется возможным охватить всего многообразия фактически действующих нелинейных пространственно-временных связей, то оценка практической сходимости и устойчивости решения проводилась путем численного эксперимента. При этом на конкретных примерах необходимо было показать, в какой степени изучаемые в расчетах динамические характеристики дискретной математической модели реактора зависят от выбранного исследователем числа узлов разбиения активной зоны. Однако следует учитывать, что если даже и нет технических ограничений, связанных с возможностями ЭЦВМ, то исследователь всегда естественно будет стремиться минимизировать размерность математиче-

ской модели и соответственно затраты времени на решение задачи.

Чтобы охватить по возможности более широкий спектр возможных процессов применительно к модели реактора РБМК, влияние дискретизации пространства активной зоны на результаты численного моделирования динамики объемных нейтронных полей рассматривалось на примерах нескольких типов аварийных ситуаций.

Методические расчеты по исследованию влияния количества расчетных узлов проводились по трехмерной динамической программе *TRIADA*, описывающей поведение трехмерного потока нейтронов в объеме активной зоны реактора РБМК в одноструйном диффузионном приближении с учетом динамики мгновенных и запаздывающих нейтронов, неоднородности физических свойств и теплогидравлических процессов в активной зоне, особенностей работы системы СУЗ.

Температура твэла и графита в каждом расчетном узле определялась путем решения уравнения теплового баланса, полученного на основе уравнения теплопроводности в предположении, что растечками тепла по высоте можно пренебречь по сравнению с теплоотдачей к теплоносителю. Распределение плотности теплоносителя по каналам реактора определялось на основе одномерных уравнений законов сохранения энергии, массы и количества движения, решаемых в рамках приближения модели дрейфа для двухфазного потока.

В уравнениях гидродинамики и теплопроводности для целого ряда замыкающих соотношений используются феноменологические зависимости, полученные, как правило, в результате обработки экспериментальных данных. Уравнение для потока нейтронов (Φ) в объеме активной зоны реактора, описанное в диффузионном одноструйном модифицированном приближении, имеет вид:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = M^2 \nabla^2 \Phi + (K_\infty - 1)\Phi + K_\infty \beta \sum_{i=1}^6 a_i C_i - K_\infty \beta \Phi;$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \lambda_i (\Phi - C_i);$$

$$\Phi|_{t=0} = \Phi_0, \quad C_i|_{t=0} = C_{i0};$$

$$\Phi = \Phi(\vec{r}, t), \quad C_i = C_i(\vec{r}, t), \quad (X, Y, Z) \in V.$$

Область V , в которой описана диффузия нейтронов, включает в себя активную зону с экстраполированной границей (Γ), на которой граничное условие имеет вид $\Phi|_\Gamma = 0$.

Существенным фактором, влияющим на поведение полей нейтронов, является учет зависимости локальных коэффициентов диффузии M^2 и K_∞ от всей совокупности физических, теплогидравлических и конструктивных характеристик. Зависимость M^2 и K_∞ от перечисленных выше параметров определяется на основе данных физических расчетов поперечек с набором разных свойств из числа реально возможных их сочетаний.

В рассматриваемой программе многопараметрические зависимости этих величин вводятся как исходные данные, которые также должны содержать информацию по объемному нейтронному полю, загрузке ре-

актора, выгоранию топлива, положению органов СУЗ и основным теплофизическим характеристикам реактора.

При моделировании пространственной динамики РБМК использовалась прямоугольная система координат (X, Y, Z) , наиболее естественно описывающая все особенности конструкции реактора. При этом весь объем реактора разбивался на прямоугольные параллелепипеды с расчетными узлами, расположенными в их центре.

В силу конструктивных и технологических особенностей РБМК (наличие симметрии в размещении органов СУЗ, стратегии перегрузок топлива и т.п.) целесообразными являются следующие варианты выбора числа расчетных узлов в плане реактора (X, Y) :

— число узлов, равное числу каналов (рабочих, сузовских), т.е. ~ 2000 ;

— число узлов, равное числу ячеек периодичности с 4×4 каналами, т.е. ~ 140 ;

— число узлов, равное числу ячеек с двумя основными типами поперечек с 2×2 каналами (топливные каналы, топливные каналы с одним сузом), т.е. ~ 540 .

В НИКИЭТ имеются модификации трехмерных программ *TRIADA* (до 540 узлов в плане) и *TROJA* (до 2000 узлов в плане).

После определения принципов выбора числа расчетных узлов в плане реактора одним из важнейших аспектов разработки расчетной методики является выбор степени дискретизации активной зоны в аксиальном направлении, поскольку при аварийных режимах могут возникать значительные и интенсивные глобальные и локальные деформации нейтронных высотных полей, вызванные как изменениями тех или иных пространственных теплофизических и гидродинамических процессов в объеме реактора, так и внешними воздействиями.

Вопрос выбора числа учитываемых слоев по высоте реактора в данной работе рассмотрен на примере условий, сформировавшихся в реакторе четвертого блока Чернобыльской АЭС непосредственно перед аварией 26. 04. 86 г.

В качестве тестового режима реализовывался режим ввода в активную зону всех стержней СУЗ со скоростью движения поглотителя и вытеснителя $0,4$ м/с.

Характеризовать поведение реактора большими физическими размерами такими параметрами, как интегральная мощность N_Σ и рассчитанная по ней реактивность ρ , во многих случаях является непредставительным. Для проведения сопоставительного анализа особенностей пространственной динамики необходимо кроме N_Σ и ρ также использовать такие параметры, как мощности левой и правой технологических половин (N_L, N_R), верхней и нижней частей реактора (N_B, N_U), максимальные радиальные (J) и локальные по объему нейтронные потоки (Φ), средневзвешенное объемное паросодержание теплоносителя (φ), температура топлива (T) и т.д.

Некоторые результаты расчетных методических исследований приведены на рис. 1—10, где показано влияние выбранного числа слоев по высоте реактора.

Как сказано выше, рассчитывался режим срабатывания АЗ-5 при исходных данных, соответствующих

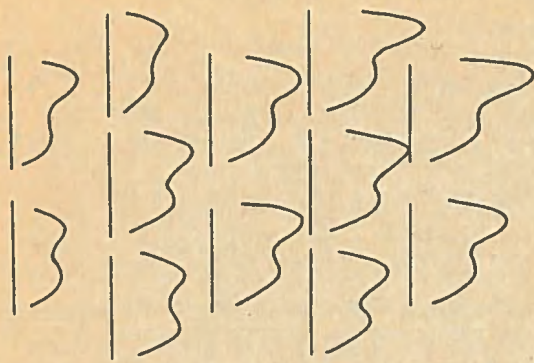


Рис. 1. Распределение профиля энерговыделения по объему активной зоны, зарегистрированное высотными датчиками

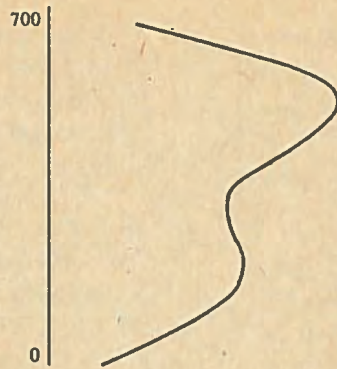


Рис. 2. Усредненный по всем датчикам профиль энерговыделения по высоте активной зоны

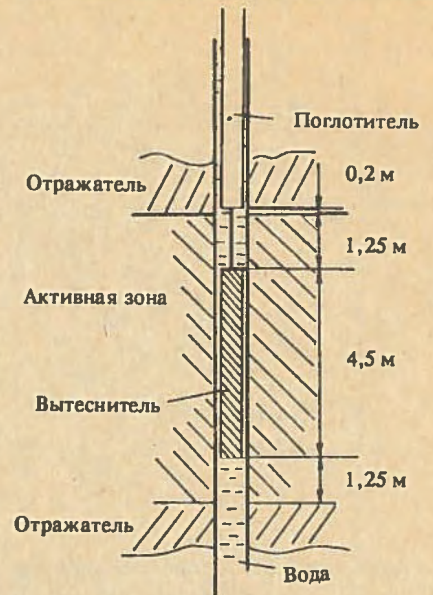


Рис. 3. Положение стержней СУЗ в реакторе, находящихся на верхнем концевике

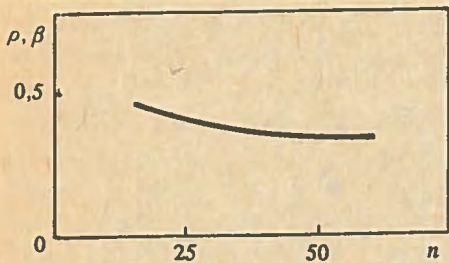


Рис. 4. Зависимость выбега реактивности от числа расчетных узлов ($\Delta K_{\infty}(y) = 0$)

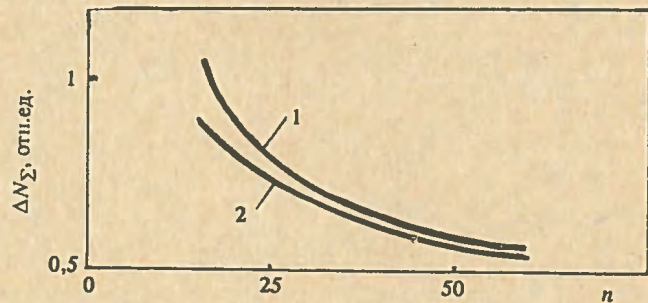


Рис. 5. Влияние числа расчетных узлов на величину всплеска интегральной мощности: 1 — с учетом плотностного эффекта реактивности, $\Delta K_{\infty}(y) \neq 0$; 2 — плотностной эффект реактивности отсутствует, $\Delta K_{\infty}(y) = 0$

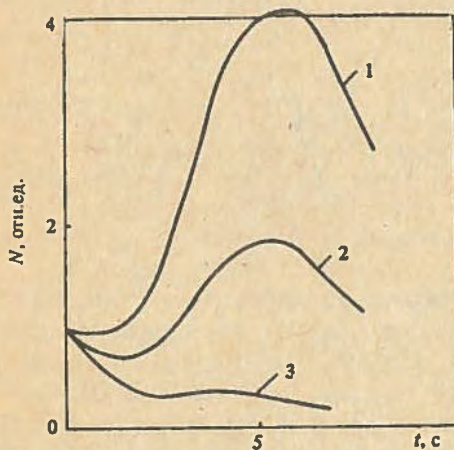


Рис. 6. Поведение интегральной мощности и мощностей верхней и нижней частей реактора ($n = 21$; $\Delta K_{\infty}(y) = 0$): 1 — мощность нижней части реактора N_n ; 2 — интегральная мощность N ; 3 — мощность верхней части реактора N_v

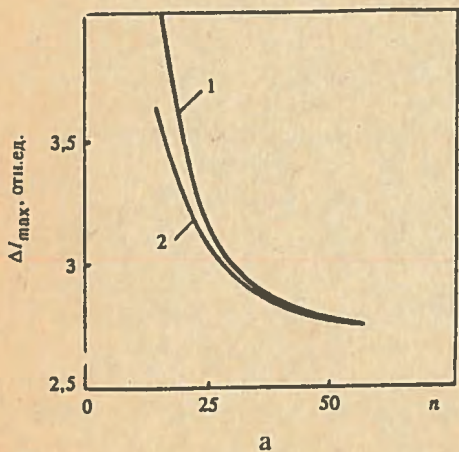
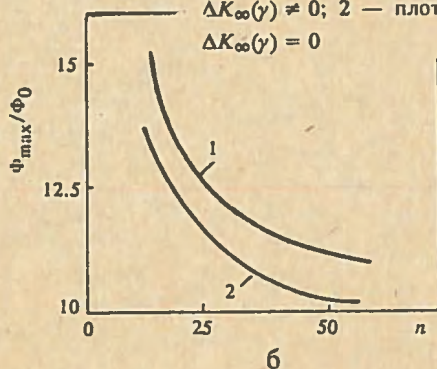


Рис. 7. Влияние числа расчетных узлов на всплеск максимального радиального энерговыделения (а) и на локальные всплески энерговыделения (б): 1 — с плотностным эффектом реактивности, $\Delta K_{\infty}(y) \neq 0$; 2 — плотностной эффект реактивности отсутствует, $\Delta K_{\infty}(y) = 0$



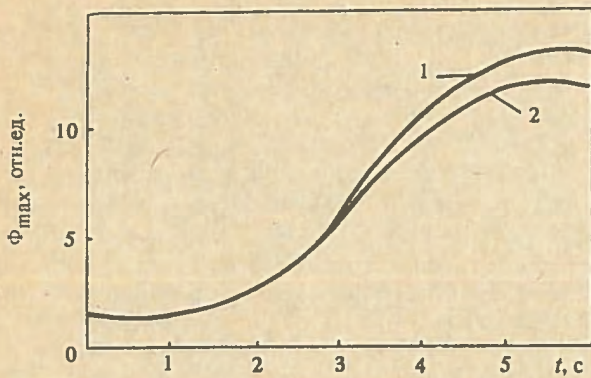


Рис. 8. Динамика изменения локального нейтронного потока в зависимости от числа расчетных узлов: 1 - $n = 15$; $\Delta K_{\infty}(\gamma) = 0$; 2 - $n = 21$; $\Delta K_{\infty}(\gamma) = 0$

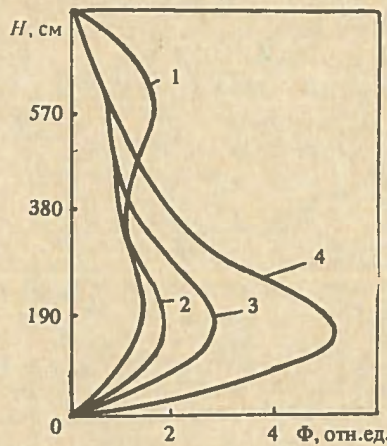


Рис. 9. Деформация высотного нейтронного поля на первом этапе переходного режима: 1 - 0 с; 2 - 2 с; 3 - 2,5 с; 4 - 3 с

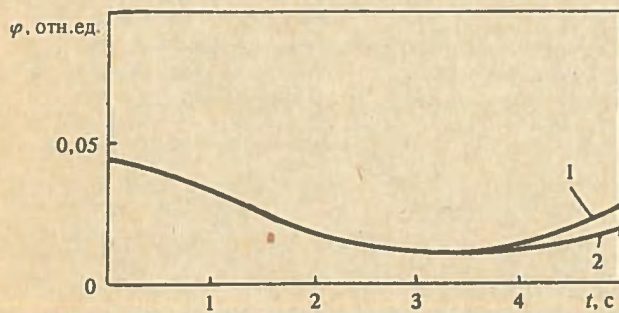


Рис. 10. Динамика изменения средневзвешенного объемного паросодержания в зависимости от числа расчетных узлов: 1 - $n = 21$; 2 - $n = 15$

предаврийному состоянию на четвертом блоке ЧАЭС без каких-либо других возмущений. Качественная картина поведения основных параметров реактора в данном режиме обсуждалась в целом ряде работ [1—4].

Поэтому здесь будет приведено только краткое качественное описание этого аварийного процесса. Для качественного описания существенно, что исходное нейтронное поле хотя и неоднородно по объему реактора (см. рис. 1), но в целом, если усреднить его по всем каналам, имеет явно выраженный максимум в верхней половине активной зоны и некоторый провал в центре (см. рис. 2).

Поскольку практически все стержни РР перед аварией находились на верхних концевиках, то исходное положение элементов стержней в реакторе может быть проиллюстрировано схемой на рис. 3.

Из представленных рисунков можно качественно предположить, что при движении стержней вниз в первые секунды следует ожидать снижения общей мощности, перекачки высотных полей в нижнюю часть реактора с возможным затем ростом средней мощности из-за ее увеличения в нижней части. Поскольку при этом возможные изменения плотности теплоносителя с запаздыванием, обусловленным тепловой инерцией ТВЭЛ (постоянная времени ~ 10 с), будут происходить в верхней части реактора, где нейтронное поле будет уже "придавлено", то можно говорить о пространственной "фильтрации" или "расслоении" плотностного эффекта. Вследствие этого при методических исследованиях было решено "отключить" в модели плотностной эффект, исследовав его отдельно.

С учетом сделанных выше замечаний влияние количества выбранных расчетных слоев по высоте на поведение некоторых параметров реактора проиллюстрировано на рис. 4—11. Видно, что в условиях существенной неоднородности нейтронных полей расчетное поведение реактивности, обусловленное вытеснением столбов воды в каналах СУЗ в нижней части активной зоны (см. рис. 3), существенно зависит от числа расчетных слоев. При числе расчетных слоев $n \leq 15$ даже поведение интегральных параметров может качественно отличаться. Полученные результаты свидетельствуют также о том, что при увеличении числа n имеется тенденция к сходимости результатов к некоторому пределу.

Важно отметить, что даже в случае схемы, обеспечивающей для рассматриваемого режима относительно слабую зависимость интегральных параметров N и ρ от числа расчетных узлов (см. рис. 4—7, а), поведение локальных параметров может существенно отличаться (см. рис. 7, б и 8).

Из вышеизложенного следует, что сходимость результатов наблюдается при шаге разбиения по высоте активной зоны порядка $h < \sqrt{M^2}$ ($M^2 = 400 \div 500 \text{ см}^2$), т.е. когда число расчетных слоев по высоте взято более 30.

Следует также обратить особое внимание на динамику изменения величины φ в рассматриваемом ре-

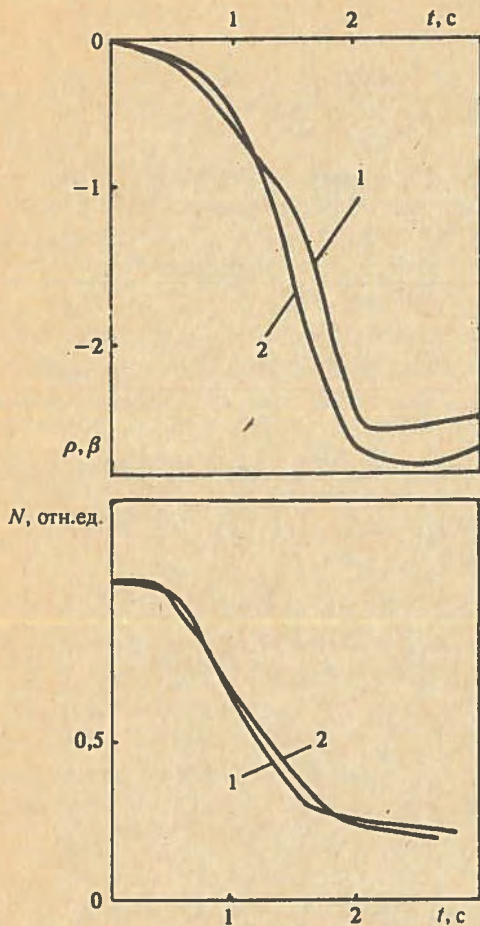


Рис. 11. Поведение нейтронной мощности и реактивности при сбросе 24 стержней быстрой аварийной защиты на первом блоке Игналинской АЭС ($n = 59$): 1 — расчет; 2 — эксперимент

жиме (см. рис. 11). На начальном этапе переходного процесса наблюдается устойчивое снижение этой величины, что указывает на то, что без каких-либо дополнительных возмущений по теплоносителю плотностной эффект реактивности не может играть существенной роли на начальном этапе переходного процесса, а будет проявляться лишь при условии более чем двукратного увеличения тепловой мощности. Причем в силу относительно незначительной величины φ , а также существенно нелинейного характера плотностного эффекта, его роль в рассматриваемой математической модели могла проявиться лишь после 4 с с начала ввода стержней, хотя согласно прямым расчетам по трехмерной модели такой интегральный параметр, как эффект полного обезвоживания активной зоны в исходном состоянии имел величину $\Delta\rho_{\gamma+0} = 4,8\beta$.

В соответствии с мероприятиями, осуществляемыми в рамках повышения безопасности АЭС с реакторами РБМК, на всех блоках вводится в действие быстрая аварийная защита. Расчетные исследования, направленные на определение динамических и физических параметров БАЗ в условиях ранее реализованных мероприятий по улучшению физических характеристик активных зон, также осуществлялись по программе TRIADA.

Проведенный в процессе методических исследований анализ показал, что и в данном случае необхо-

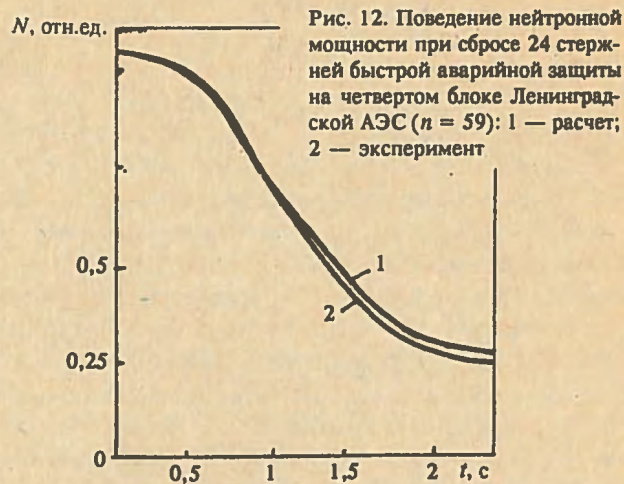


Рис. 12. Поведение нейтронной мощности при сбросе 24 стержней быстрой аварийной защиты на четвертом блоке Ленинградской АЭС ($n = 59$): 1 — расчет; 2 — эксперимент

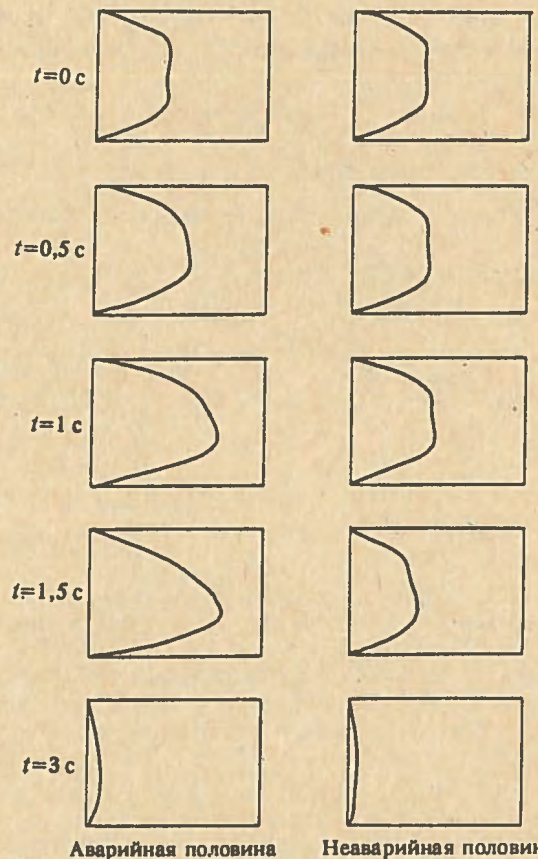


Рис. 13. Деформация высотных полей в условиях аварийного затопления реактора при разрыве напорного коллектора ($n = 59$)

димо учитывать указанные выше условия на число расчетных узлов по высоте при проведении расчетов по безопасности.

Наряду с указанными выше методическими исследованиями проводилась верификация программы по экспериментальным данным, полученным на АЭС. В частности, при рекомендуемом критерии по n имеется удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных данных как по величине, так и скорости изменения нейтронной мощности и реактивности в режиме ввода в активную зону 24 стержней быстрой аварийной защиты за время 2,1 с на реакторах Ленинградской и Игналинской АЭС (см. рис. 11, 12).

Для иллюстрации на рис. 13 приведены результаты расчета динамики нейтронных полей в объеме активной зоны реактора РБМК-1000 при разрыве напорного коллектора и аварийном заглушении реактора после выполнения мероприятий по повышению безопасности.

Выполненные серии методологических исследований, результаты которых изложены в данной работе, не охватывают всех проблем, связанных с моделированием и верификацией трехмерных динамических программ для реакторов больших физических размеров. Однако уже выполненные работы свидетельствуют об актуальности решаемой задачи, поскольку неправильный выбор схем, количества расчетных узлов может приводить к неправильным результатам при анализе различных аварийных ситуаций.

Поэтому предполагается в дальнейшем расширить исследования как в методическом, так и экспериментальном плане, и особенно обратить внимание на чувствительность результатов к неопределенности исходной информации.

УДК 621. 039.562.2

СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В КОМПЛЕКСЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЭНЕРГОБЛОКА С РБМК

А.Н. Алексаков, В.В. Захарова, Е.В. Николаев, В.Б. Павлов

Излагаются результаты разработки и идентификации программного комплекса TRIPOLY, воспроизводящего физические процессы в объеме реактора и в агрегатах основного оборудования энергоблока АЭС с реакторами типа РБМК.

MEANS OF MODELLING THE PROCESSES IN A COMPLEX OF TECHNOLOGICAL POWER UNIT SYSTEMS WITH RBMK. A.N. ALEKSAKOV, V.V. ZAKHAROVA, E.V. NIKOLAYEV, V.B. PAVLOV. Results of developing and identifying program complex TRIPOLY reproducing physical processes within the reactor space and within the equipment of basic components of NPP power unit with RBMK type reactors are suggested.

Для решения задач организации управления ядерными реакторами последние несколько лет интенсивно разрабатываются средства моделирования динамики физических процессов в комплексе технологических систем энергетических установок с ядерными реакторами. В данной статье рассмотрены результаты разработки программного комплекса TRIPOLY, предназначенного для моделирования переходных и аварийных режимов энергоблока с реакторами типа РБМК.

В состав комплекса входит модель физических процессов в объеме активной зоны РБМК, воспроизводящая поведение трехмерного поля потока нейтронов в связи с действием каждого из 211 стержней регулирования и основных эффектов реактивности.

Для описания поведения энергораспределения в объеме активной зоны РБМК в данном случае, как и во многих других работах [1—5], используется моди-

Список литературы

1. Авария на Чернобыльской АЭС: год спустя/В.Г. Асмолов, Е.О. Адамов и др.//Атомная энергия. 1988. Т.64. Вып. 1. С. 3—23.
2. Анализ первой фазы развития аварийного процесса на четвертом блоке Чернобыльской АЭС/Е.О. Адамов, В.П. Василевский и др.//Атомная энергия. 1988. Т. 64. Вып. 1. С. 24—28.
3. Krayushkin A.V., Kubarev A.V. The modelling of the first phase of Chernobyl — 4 accident//The First International Workshop on Severe Accidents in Nuclear Power Plants. Sochy. USSR. 30 oct. — 3 nov. 1989.
4. Chan P.S.W., Dastur A.R. The sensitivity of positive scram reactivity to neutronic decoupling in the RBMK-1000//Nucl. Sci. Eng. June 1989.

Статья поступила в редакцию
25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер.
Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 25—30.

фицированное одногрупповое (по энергиям) диффузионное приближение с постоянным коэффициентом диффузии, с одной эффективной группой запаздывающих нейтронов и равным нулю временем жизни мгновенных нейтронов:

$$\begin{aligned} \frac{M^2 \Delta}{\beta} \Phi(\vec{r}, t) + \frac{k_{\infty} - 1}{\beta} \Phi(\vec{r}, t) - \\ - \Phi(\vec{r}, t) + C(\vec{r}, t) = 0; \\ \frac{\partial C(\vec{r}, t)}{\partial t} = \lambda(\Phi(\vec{r}, t) - C(\vec{r}, t)). \end{aligned}$$

Решение, как обычно, записывается в цилиндрических координатах, выражаемых в единицах экстраполированных размеров реактора: $\vec{r} = (r, \vartheta, z)$; $r \in [0, 1]$, $\vartheta \in [0, 2\pi]$, $z \in [0, 1]$. Переменные вычисляются в отклонениях от исходного стационарного состояния:

$$\Phi(\vec{r}, t) = \Phi(\vec{r}, 0) + \varphi(\vec{r}, t);$$

$$(k_{\infty}(\vec{r}, t) - 1)/\beta = K_0(\vec{r}, 0) + k(\vec{r}, t);$$

$$C(\vec{r}, t) = C(\vec{r}, 0) + c(\vec{r}, t);$$

$$\Phi(\vec{r}, 0) = C(\vec{r}, 0);$$

$$\left[\int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^1 \Phi(\vec{r}, t) r dr d\vartheta dz \right] / \left[\int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^1 rd r d\vartheta dz \right] = 1.$$

Исходная форма $\Phi(\vec{r}, 0)$ удовлетворяет уравнению

$$[(M^2 \Delta) / \beta] \Phi(\vec{r}, 0) + K(\vec{r}, 0) \Phi(\vec{r}, 0) = 0. \quad (1)$$

Учитывая это, уравнения для отклонений можно записать так:

$$[(M^2 \Delta) / \beta] \varphi(\vec{r}, t) + K_0(\vec{r}, 0) \varphi(\vec{r}, t) + k(\vec{r}, t) (\Phi(\vec{r}, t) +$$

$$+ \varphi(\vec{r}, t)) - \varphi(\vec{r}, t) + c(\vec{r}, t) = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial c(\vec{r}, t)}{\partial t} = \lambda(\varphi(\vec{r}, t) - c(\vec{r}, t)).$$

Член $k(\vec{r}, t) (\Phi(\vec{r}, 0) + \varphi(\vec{r}, t))$ включает сложные нелинейные зависимости. Во многих работах (см., например, [1]) для анализа поведения энергораспределения вблизи стационарного состояния этот член линеаризуется (пренебрегают произведением $k(\vec{r}, t) \varphi(\vec{r}, t)$), а решение представляется в виде ряда, составленного из собственных функций уравнения

$$\nabla^2 \Psi(\vec{r}) + \alpha^2 \Psi(\vec{r}) = -\lambda^2 \Psi(\vec{r}). \quad (3)$$

Решения этого уравнения имеют вид $\Psi_i = (R(r) \Theta(\vartheta) Z(z))_i$ и этим собственным функциям соответствует набор собственных чисел $\{\lambda_i^2\}$. Структура базисных функций Ψ_i здесь и в работе [1] совершенно одинакова: радиально-азимутальные компоненты учитывают наличие зоны плато по радиусу, аксиальные компоненты — синусы.

В данном случае требуется находить решение при глубоких изменениях параметров и линеаризация недопустима. Прямое применение методов гармонического анализа в этих условиях вызывает серьезные вычислительные трудности. Эти трудности в данной работе удалось преодолеть, вычисляя $\rho(\vec{r}, t) = k(\vec{r}, t) (\Phi(\vec{r}, 0) + \varphi(\vec{r}, t))$ в пространстве геометрических координат, а не в пространстве амплитуд гармоник. В "полигармоническое" решение результат этих вычислений возвращается в разложенном по гармоникам виде.

Стационарная (начальная) форма поля потока нейтронов задается в виде ряда $\Phi(\vec{r}, 0) = \sum_i \Phi_i(0) \Psi_i$.

Из уравнения (1) находим

$$K_0(\vec{r}, 0) = -[\Delta \Phi(\vec{r}, 0) / \Phi(\vec{r}, 0)] (M^2 / \beta).$$

Учитывая, что Ψ_i удовлетворяют уравнению (3), получаем

$$\frac{\Delta \Phi(\vec{r}, 0)}{\Phi(\vec{r}, 0)} = \frac{\sum_i \Phi_i(0) (\alpha_0^2 + \lambda_i^2) \Psi_i}{\sum_i \Phi_i(0) \Psi_i} =$$

$$= \alpha_0^2 + \frac{\sum_i \Phi_i(0) \lambda_i^2 \Psi_i}{\sum_i \Phi_i(0) \Psi_i}.$$

Представив переменные в виде разложения в ряд по собственным функциям уравнения (3) (гармоникам)

$$\varphi(\vec{r}, t) = \sum_i \varphi_i(t) \Psi_i;$$

$$\rho(\vec{r}, t) = \sum_i \rho_i(t) \Psi_i;$$

$$c(\vec{r}, t) = \sum_i c_i(t) \Psi_i$$

и подставив их в уравнение (2), получим

$$\sum_i^m \left(-\frac{M^2 \lambda_i^2}{\beta} - 1 + \frac{M^2}{\beta} \frac{\sum_q^m \lambda_q^2 \Phi_q(0) \Psi_q}{\sum_q^m \Phi_q(0) \Psi_q} \right) \varphi_i(t) \Psi_i =$$

$$= -\sum_i^m \rho_i(t) \Psi_i - \sum_i^m c_i(t) \Psi_i.$$

Домножив это уравнение на Ψ_j и проинтегрировав по объему, получим уравнения вида

$$\left(\frac{M^2 \lambda_j^2}{\beta} + 1 \right) \varphi_j(t) -$$

$$- \frac{M^2}{\beta} \sum_i^m \varphi_i(t) \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^1 \frac{\sum_q^m \lambda_q^2 \Phi_q(0) \Psi_q}{\sum_q^m \Phi_q(0) \Psi_q} \Psi_i \Psi_j r dr d\vartheta dz =$$

$$= \rho_j + c_j; \quad i = 1, \dots, m.$$

Обозначив

$$a_{ij} = -\frac{M^2}{\beta} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^1 \frac{\sum_q^m \lambda_q^2 \Phi_q(0) \Psi_q}{\sum_q^m \Phi_q(0) \Psi_q} \Psi_i \Psi_j r dr d\vartheta dz \quad \text{для } i \neq j;$$

$$a_{jj} = 1 + \frac{M^2}{\beta} \left(\lambda_j^2 - \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^1 \frac{\sum_q^m \lambda_q^2 \Phi_q(0) \Psi_q}{\sum_q^m \Phi_q(0) \Psi_q} \Psi_j^2 r dr d\vartheta dz \right)$$

и считая a_{ij} элементами матрицы A , можно записать эту систему уравнений в матричной форме $A\Phi = R + C$, где Φ , R и C — векторы $\{\varphi_i\}$, $\{\rho_i\}$ и $\{c_i\}$ соответственно, и получить основную формулу для вычисления $\varphi_i(t)$: $\Phi = A^{-1}(R + C)$.

На каждом временном шаге для вычисления очередных значений R и C используются значения Φ , полученные на предыдущем шаге.

Все физические средства, обеспечивающие критичность реактора при заданной стационарной форме поля потока нейтронов, включены в K_0 и входят в решение через структуру матрицы A . Связь элементов

a_{ij} , $K_{ij}(\vec{r})$ выражаются аналитически. Задание исходной статистики при этом сводится к предварительному расчету элементов матрицы A по известным формулам. В процессе расчета динамики A не изменяется, а поведение $\varphi(\vec{r}, t)$ определяется только отклонениями $k(\vec{r}, t)$. В $k(\vec{r}, t)$ можно выделить две существенно разные компоненты:

— результаты перемещения стержней регулирования $k_{\text{стерж}}(\vec{r}, t)$;

— приращения переменных (температур топлива и графита, плотности теплоносителя, отравления ксеноном и т.п.), влияющих на коэффициент размножения.

$k_{\text{стерж}}(\vec{r}, t)$ отлично от нуля только при смещении стержней из исходного состояния

$$k_{\text{стерж}}^l(\vec{r}, t) = \rho \int_{l(0)}^{l(t)} \delta(r - r_l, \vartheta - \vartheta_{l,\lambda}, z - z^*) dz^*,$$

т.е. для данного (l -го) стержня, переместившегося из положения $l(0)$ в положение $l(t)$, $k_{\text{стерж}}^l(\vec{r}, t)$ отлично от нуля только вдоль линии r_l, ϑ_l, z для z в пределах между $l(0)$ и $l(t)$, при этом $k_{\text{стерж}}^l(\vec{r}, t) = k_{\text{стерж}}(z, t) = \rho^l$. Знак ρ^l определяется знаком приращения положения стержня относительно $l(0)$, т.е. извлечению поглотителя из зоны соответствует появление положительного ρ^l .

В описании стержней регулирования воспроизведены реальные конструкции стержней ручного регулирования и укороченных стержней поглотителей и их конструктивные особенности (поглотитель, "телескоп", вытеснитель). Для реальной конструкции стержня эпюра $k_{\text{стерж}}(z, t)$ формируется путем суперпозиции "следов" перемещения участков стержня с разными физическими свойствами. Рассмотрим простейший случай, полагая, что поглотитель и вытеснитель состыкованы без зазора.

Вклад в вектор R от всех стержней является суммой вкладов от каждого перемещенного стержня. Для определения вклада от одного стержня в ρ_j надо произведение $k_{\text{стерж}}^l(\vec{r}, t) \Phi(\vec{r}, t)$ домножить на Ψ_j и проинтегрировать по объему, в результате чего имеем

$$\rho_{\text{стерж}_j}^l = \rho^l \int_{l(0)}^{l(t)} \sum_i^m (\Phi_i(0) + \varphi_i(t)) \Psi_i(r_l, \vartheta_l, z) \Psi_j(r_l, \vartheta_l, z) dz.$$

Из эффектов реактивности учтены изменения плотности теплоносителя в технологических каналах реактора, изменения температуры топлива и замедлителя, отравление ксеноном. Схема вычисления вклада в реактивность от приращений этих переменных выглядит следующим образом: для ρ -го канала формируется эпюра $k_{0c}^p(z, t) = \alpha_i T_i^p(z, t) + \alpha_\gamma \gamma^p(z, t) + \alpha_{\text{Xe}} T_c^p(z, t) + \alpha_{\text{Xe}} X^p(z, t) - k_{0c}^p(z, 0)$,

где $\alpha_i T_i^p(z, t)$ — вклад от температуры топлива; $\alpha_\gamma \gamma^p(z, t)$ — вклад от изменения плотности теплоносителя; $\alpha_c T_c^p(z, t)$ — вклад от температуры графита; $\alpha_{\text{Xe}} X^p(z, t)$ — вклад от ксенона. Далее произведение $k_{0c}^p(z, t) \Phi^p(z, t)$ аппроксимируется рядом функций $Z(z)$ и превращается таким образом в вектор $\{\rho_{0c}^p\}$ коэффициентов Фурье.

Воспроизведение всех технологических каналов РБМК в схеме метода гармоник не обязательно. Достаточно произвести приведенные выше вычисления на гораздо более редкой "реперной" сетке каналов. Необходимо только, чтобы их число было не менее числа радиально-азимутальных гармоник, принятых в модели, а сетка была достаточно равномерной.

Преобразование набора векторов $\{\rho_{0c}^p\}$ в вектор ρ_{0c} осуществляется методом наименьших квадратов: $\rho_{0c} = (\Psi^* \Psi)^{-1} \Psi^* \{\rho_{0c}^p\}$, где Ψ — матрица значений радиально-азимутальных гармоник в точках расположения "реперных" каналов.

Поведение температуры топлива $T_i^p(z, t)$ описано в отклонениях средней температуры сердечников твэлов от температуры теплоносителя. Поле температуры в расчете — безразмерная функция с нормировкой, совпадающей с нормировкой поля потока. Связь температуры с потоком в предположении, что коэффициент теплопередачи постоянный, устанавливается соотношением

$$\tau_i \frac{\partial T_i^p(z, t)}{\partial t} = \varphi^p(z, t) - T_i^p(z, t); \quad \tau_i \approx 10 \text{ с.}$$

Коэффициент α_i равен произведению коэффициента реактивности α_i (в единицах коэффициента размножения на градус Цельсия) на разность средних температур сердечника и теплоносителя и выражен в единицах β .

Поведение температуры графита и влияние ее изменений на размножение нейтронов моделируется аналогичным образом. При описании учтено влияние состава смеси азота и гелия, заполняющей полости графитовой кладки, на коэффициент теплопередачи от графита к теплоносителю.

При моделировании динамики концентрации ксенона и его влияния на размножение нейтронов использованы общеизвестные соотношения и комментировать их нет необходимости.

Для описания поведения плотности теплоносителя $\gamma^p(z, t)$ использована одномерная распределенная модель теплогидравлики кипящего канала РБМК в квазистационарном приближении.

α_γ — плотностной коэффициент реактивности в единицах β на единицу изменения плотности в кг/м^3 .

Модель теплогидравлики технологических каналов реактора используется для воспроизведения плотностного эффекта реактивности в модели нейтронной кинетики и одновременно входит составной частью в модель процессов в контуре циркуляции.

Модель реактора воспроизводит сигналы 130 радиальных и 12 семисекционных высотных датчиков контроля энерговыделения, 24 боковых ионизационных камер (БИК) и датчиков системы локального автоматического регулирования (ЛАР).

В модели контура многократной принудительной циркуляции описаны две петли циркуляции. В составе каждой петли воспроизведены пароводяные коммуникации, сепараторы пара, опускные трубопроводы, группа из четырех параллельных главных циркуляционных насосов (ГЦН) с дроссельно-регулирующими клапанами (ДРК) на напоре, нижние водяные коммуникации с запорно-регулирующими клапанами. Описаны система подачи питательной воды (пять параллельных питательных электронасосов (ПЭН), тракты подачи воды в две петли циркуляции, каждая с группой параллельных регулирующих клапанов) и система распределения острого пара (паропроводы, стопорно-регулирующие клапаны двух турбин, быстродействующие редукционные устройства со сбросом пара в барботер и конденсатор (БРУ-Б и БРУ-К), главные предохранительные клапаны (ГПК)).

Системы автоматического регулирования в модели представлены регулятором мощности реактора (АР, работающий по сигналам БИК, или ЛАР по выбору), регуляторами уровня и давления в сепараторах и автоматикой БРУ-К, БРУ-Б, ГПК, ДРК ГЦН и рециркуляции ПЭН.

Программный комплекс *TRIPOLY* отличается высоким быстродействием. На средствах вычислительной техники с эквивалентной вычислительной мощностью около 4 MIPS (ЕС 1066) расчет единицы времени переходного процесса требует примерно равного процессорного времени, т.е. возможно моделирование в темпе реального времени. Комплекс *TRIPOLY* построен на блочно-модульном принципе, обмен между модулями минимизирован и может осуществляться без синхронизации вычислительного процесса для разных модулей, поэтому комплекс хорошо приспособлен для постановки в локальной сети ЭВМ, кроме того, комплекс работает на персональных ЭВМ.

Необходимость реализовать работу модели такого сложного объекта в реальном времени в данном случае резко обостряет обычное для любых расчетов противоречие между подробностью описания и мощностью доступных средств вычислительной техники. Обосновать теоретически правомерность принимаемых допущений и упрощений модели удается не во всех случаях. Кроме того, в такой модели требуется задать большой объем параметров, граничных и начальных условий. Все они известны для реального объекта с большей или меньшей долей неопределенности. В этих условиях необходимой и весьма трудоемкой частью работы над моделью становится доказательство правомерности ее использования при решении инженерных задач. Фор-

мальных критериев такой правомерности не существует, тем не менее необходимо, чтобы разработанные на модели технические решения давали требуемый результат на реальном объекте.

Для доказательства состоятельности программно-го комплекса *TRIPOLY* используются экспериментальные данные. Хотя это средство доказательства считается наиболее убедительным, применение его на практике затруднено из-за невозможности реализовать на действующем объекте большинство режимов, которые должна воспроизводить модель при инженерных исследованиях, из-за ограниченного объема измеряемых параметров, несовершенства средств контроля и регистрации, из-за стохастических компонент в реальных процессах и т.п.

Важным источником экспериментальной информации являются результаты специально организованных экспериментов. Достоинством данных, полученных таким образом, является то, что условия эксперимента достоверно известны и приняты необходимые меры для полноценной регистрации результатов.

В связи с этим в данной работе идентификация программного комплекса *TRIPOLY* осуществлена по результатам штатной серии опытов, регулярно проводимых на РБМК для определения физических и динамических характеристик этих реакторов [6, 7]. В их числе опыт по определению τ_{01} , т.е. периода развития перекоса радиально-азимутального энергораспределения при работе системы АР в отсутствие управляющих воздействий на поле энерговыделения, и опыт по определению парового эффекта реактивности, количественно выражаемого значением парового коэффициента реактивности α_{φ} . Опыт по определению α_{φ} сопровождается "взвешиванием" четверки стержней АР, при котором одновременно определяется "быстрый" мощностной эффект реактивности. Выбор именно этих режимов для идентификации обусловлен тем, что, во-первых, указанные опыты достаточно стандартны и технология их проведения хорошо отработана, во-вторых, каждый опыт включает стандартную, общепринятую и относительно легко воспроизводимую методику обработки результатов и, в-третьих, по данным опытам накоплен богатый экспериментальный материал.

Опыт по определению τ_{01} состоит в том, что при включенной системе АР временно прекращаются действия по поддержанию формы поля и фиксируется развивающаяся при этом деформация. Она имеет вид перекоса энерговыделения по половинам реактора, т.е. определяется формой первой радиально-азимутальной гармоники. Амплитуда развития перекоса во времени изменяется примерно по экспоненте. Показатель степени этой экспоненты является мерой стабильности поля в текущем состоянии реактора и получил общепринятое название τ_{01} .

Начальные условия опыта определяются его предысторией и носят случайный характер. Особенности начальных условий конкретного опыта не влияют

на саму измеряемую величину τ_{01} , а сказываются лишь на точности ее измерения, которая определяется тем, насколько явно в конце опыта исследуемое движение преобладает над движениями, обусловленными предысторией. С целью повышения точности в условиях жестких ограничений допустимой амплитуды наблюдаемого азимутального перекоса на практике стремятся перед опытом сформировать хорошее статическое состояние.

Азимутальная ориентация перекоса не произвольна. Известно, что при значительном положительном паровом эффекте реактивности проявляется действие отрицательной обратной связи по расходу питательной воды. Суть явления состоит в следующем. При возникновении перекоса энергораспределения по технологическим половинам реактора генерация пара в той половине, где мощность снизилась, уменьшается. В ответ на это регулятор уровня в барабанах-сепараторах данного питательного узла снижает расход питательной воды, что вызывает увеличение теплосодержания циркуляционной воды за точкой смешения. С известным транспортным запаздыванием на вход данной половины реактора начинает поступать более горячий теплоноситель, что приводит к увеличению паросодержания и вследствие положительного парового эффекта реактивности к росту мощности. На противоположной половине реактора все происходит по той же схеме, но наоборот. Описанный механизм оказывает противодействие развитию перекоса мощности по технологическим половинам реактора. По этой причине в опытах по определению τ_{01} при $\alpha_{\varphi} > 0$ преимущественно реализуется ориентация перекоса поперек технологических половин. Постоянная времени развития амплитуды первой азимутальной гармоники, ориентированной поперек технологических половин, является объективной мерой стабильности энергораспределения.

Поскольку τ_{01} определяется всей совокупностью эффектов реактивности, можно проверить правильность воспроизведения в модели физико-динамических свойств реактора в целом, задавая в модель параметры эффектов реактивности, характерные для определенного состояния реактора, и сравнивая τ_{01} , полученное в расчете и на реакторе в этом же состоянии.

В качестве экспериментального материала для сопоставления были использованы результаты опытов по определению τ_{01} , проведенные на 2-м блоке Курской АЭС в июне 1983 г.

При проведении расчетов в программе была введена в действие система AP и заданы известные на момент проведения опытов значения коэффициентов реактивности: плотностной $\alpha_{\rho} = -0,0035 \beta / (\text{кг}/\text{м}^3)$, по температуре топлива $\alpha_T = -1 \beta$ и по температуре графита $\alpha_c = 3 \beta$ (температуры топлива и графита рассчитываются в модели в безразмерных долях средних температур топлива и графита, соответствующих но-

минальной мощности реактора). Стационарное отравление ксеноном было принято равным 3%.

В модели азимутальная зависимость гармоники, ориентированной поперек технологических половин, описывается синусом, поэтому для удобства дальнейшего изложения обозначим A_{01}^{\sin} ее амплитуду, а A_{01}^{\cos} — амплитуду гармоники, ориентированной по технологическим половинам.

В первом расчете воспроизведен опыт по определению τ_{01} с перекосом, развивающимся поперек технологических половин. Начальные условия в расчете сформированы путем одновременного погружения одного стержня и извлечения другого, расположенных диаметрально противоположно соответственно в верхней и нижней (на плане) половинах реактора. Сформированный небольшой ($\sim 1\%$) перекося поля после затухания первоначального возмущения продолжал развиваться. Изменение во времени амплитуды A_{01}^{\sin} происходило по экспоненциальному закону с постоянной времени, равной 9 мин, что совпадает с экспериментальным результатом.

В тот же период на Курской АЭС был проведен опыт по определению τ_{01} с искусственным возбуждением перекоса по технологическим половинам реактора стержнями регулирования. При этом возмущение, внесенное стержнями в эксперименте, было выбрано так, чтобы разбалансы БИК не превышали 1%. После возмущения отклонения в направлении по технологическим половинам сначала стали возрастать. На самописцах питательной воды было отмечено увеличение расхода на левой половине реактора и уменьшение на правой. При этом темп развития перекоса по половинам замедлился и началась постепенная переориентация деформации поля в пользу перекоса поперек технологических половин.

Этот опыт был воспроизведен расчетным путем. Перемещение стержней регулирования, которыми вносилось возмущение, в точности соответствовали эксперименту. Развитие процесса качественно происходило так же, как и в эксперименте, однако количественное сравнение с зарегистрированным поведением разбалансом БИК обнаружило существенные различия. Объяснением этого обстоятельства служит то, что во время проведения экспериментов рассматриваемому опыту непосредственно предшествовал опыт по определению τ_{01} (проведенный по стандартной методике), в котором наблюдалась явно выраженная ориентация перекоса энергораспределения поперек технологических половин. Динамические процессы, связанные с этим опытом, к началу следующего опыта еще не успели закончиться, что естественно отразилось на развитии процесса в рассматриваемом опыте.

Для корректного сопоставления необходимо было на модели воспроизвести начальные условия реального эксперимента. Это было достигнуто путем подбора соответствующего кратковременного возмущения, возбуждающего перекося той же ориентации, что и в опы-

те, предшествующем данному. Лишь затем на модели были воспроизведены те же возмущения стержнями, что и в эксперименте.

Результаты расчетов в опыте по определению τ_{01} с возбуждением перекоса энергораспределения по технологическим половинам реактора представлены на рис. 1. Поскольку в эксперименте амплитуды гармоник определяются по показаниям датчиков контроля энерговыделения по радиусу (ДКЭР), то для сопоставления этих данных с расчетными потребовалось воспроизвести в расчете реальную инерционность ДКЭР. Сравнение представленных данных свидетельствует о хорошем совпадении расчетных и экспериментальных результатов. Хорошее совпадение поведения разбалансов БИК в расчете и эксперименте (рис. 2) подтверждает правильность моделирования показаний БИК.

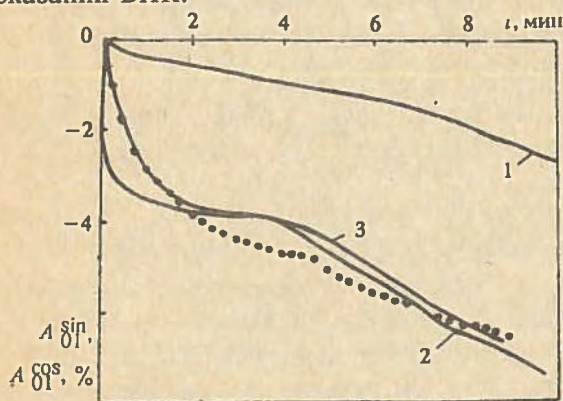


Рис. 1. Изменение во времени амплитуд A_{01}^{\sin} (1) и A_{01}^{\cos} (2), а также A_{01}^{\cos} , определенной по показаниям ДКЭР (3): — расчет, — эксперимент

Таким образом, кроме совпадения по значению τ_{01} модель хорошо воспроизводит эффект неоднородности свойств радиально-азимутального перекоса, обусловленного действием регуляторов уровня.

Опыт по определению α_{φ} состоит в следующем.

При стационарном режиме реакторной установки отключаются регуляторы уровня воды в барабанах-сепараторах, воздействующие на клапаны подачи питательной воды, которые переводятся в режим дистанционного управления. Операторы паропроизводящей установки, синхронно воздействуя на клапаны левого и правого питательных узлов, производят одновременное увеличение расхода питательной воды по половинам реактора на величину ~ 200 т/ч. Затем производится выдержка в течение ~ 2 мин без ручного перемещения регулирующих стержней. Дисбаланс питательной воды вызывает уменьшение температуры теплоносителя на входе в реактор и, соответственно, уменьшение паросодержания в активной зоне. По окончании выдержки расход питательной воды (одновременно по половинам реактора) уменьшается на ~ 400 т/ч с каждой стороны, т.е. устанавливается расход питательной воды на ~ 200 т/ч меньше, чем в исходном состоянии. Это вызывает увеличение паросо-

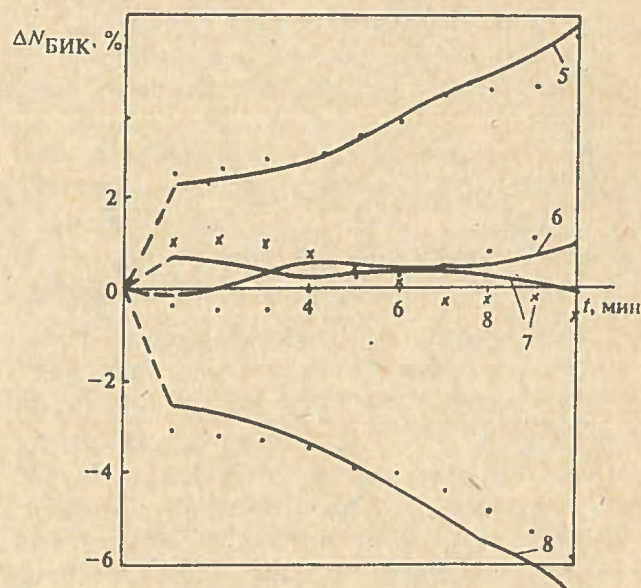
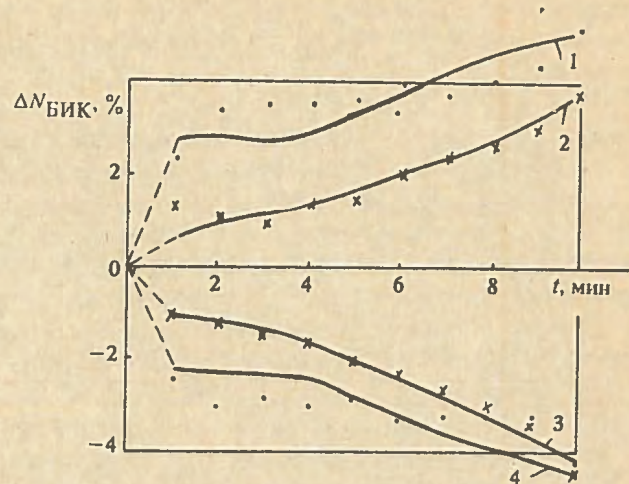


Рис. 2. Изменение во времени разбалансов БИК ($\Delta N_{\text{БИК}}$) 1AP-2 (1), 1AP-1 (2), 1AP-3 (3), 1AP-4 (4), 2AP-1 (5), 2AP-4 (6), 2AP-2 (7) и 2AP-3 (8) в опыте по определению τ_{01} с возбуждением перекоса энергораспределения по технологическим половинам реактора: — расчет; •, x — эксперимент

держания в реакторе. После выдержки в течение ~ 2 мин расход питательной воды возвращается в исходное состояние и регуляторы уровня включаются в работу. Изменение паросодержания и соответствующее изменение реактивности отрабатывается системой АР. Прямым результатом этого опыта является график перемещения стержней АР в процессе отработки возмущения по расходу питательной воды.

Затем в составе процедуры опыта по определению α_{φ} производится "взвешивание" отработавшего участка стержней АР. Для этого АР выключают и его стержни перемещают вручную с пульта оператора. Исходное положение и величина перемещения стержней, а также форма нейтронного поля в реакторе в момент "взвешивания" и в момент отработки возмущения по расходу питательной воды примерно совпадают. Прямым результатом "взвешивания" является вызванный

перемещением стержней переходный процесс изменения потока нейтронов, регистрируемый штатными датчиками.

При обработке результатов опыта с графика перемещения стержней АР в процессе отработки возмущения по питательной воде считаются значения, соответствующие исходному состоянию и в моменты, когда теплофизическое состояние в каналах реактора стабилизировалось после очередного изменения расхода питательной воды. График нейтронной мощности при "взвешивании" преобразуется в график реактивности по известным соотношениям точечной кинетики. Устранив влияние мощностных эффектов, по нему можно определить дифференциальную эффективность АР (реактивность единицы длины хода стержней) на участке, где происходили перемещения стержней АР в опыте. Этот результат используют для перевода отсчетов изменения положения стержней АР при отработке возмущения по питательной воде в изменения реактивности.

Штатная технология обработки результатов опыта предусматривает вычисление коэффициента α_φ , связывающего реактивность с объемным паросодержанием в технологических каналах, и коэффициента α_γ , устанавливающего связь с плотностью теплоносителя. Поскольку эти коэффициенты однозначно соответствуют друг другу, а в идентифицируемой модели рассчитывается плотность теплоносителя, в дальнейшем оперируем α_γ .

При вычислении коэффициента реактивности по изменению плотности теплоносителя предполагается, что единичное изменение плотности дает одинаковое приращение коэффициента размножения в любой точке объема реактора. Изменение плотности, вызванное возмущением расхода питательной воды, напрямую в опыте не определяется. В процедуре обработки результатов опыта оно воспроизводится по теплотехническим исходным данным средствами стационарного теплогидравлического расчета кипящего канала РБМК (программа ГИДРА). Эпюры приращения плотности теплоносителя вычисляются отдельно для каждой из двух петель циркуляции с учетом зафиксированных в опыте небольших расхождений условий в петлях. Распределенные приращения плотности приводятся к интегральному показателю (реактивности) путем осреднения по пространству реактора с весом, пропорциональным квадрату потока нейтронов (по теории возмущений). Для определения искомого коэффициента остается только поделить измеренное по перемещению стержней АР приращение реактивности на осредненное с квадратом потока изменение плотности.

Вышеописанная процедура обработки результатов опытов по определению плотностного эффекта представляет основные черты алгоритмов действующей типовой методики, реализованной в программе ТРАКТ (автор — В.С. Лаврухн).

В комплексе *TRIPOLY* все эффекты реактивности (в том числе плотностной) воспроизведены на основе тех же или очень близких положений. Коэффициенты

реактивности задаются туда как данные. В этих условиях идентификация комплекса *TRIPOLY* по результатам экспериментального определения плотностного эффекта сводится к тому, чтобы задать определенный из опыта коэффициент, воспроизвести на модели условия опыта, обработать модельные результаты по штатной методике, получить плотностной коэффициент и сравнить его с изначально заданным. При такой постановке задачи оказывается, что воспроизводить условия какого-либо конкретного опыта нет необходимости. Достаточно в модельном эксперименте сгенерировать традиционный для реального эксперимента набор данных, передать их в процедуру обработки под видом реальных и сравнить полученный коэффициент с заданным, что и было сделано. В модель был задан коэффициент $\alpha_\gamma = -0,003 \beta / (\text{кг/м}^3)$. В результате обработки "экспериментальных" данных по штатной методике получен $\alpha_\gamma = -0,00309 \beta / (\text{кг/м}^3)$.

Для иллюстрации работы модели в этом режиме на рис. 3 приведены графики наиболее показательных параметров, зафиксированные в расчетном эксперименте.

Опыт по "взвешиванию" стержней АР в составе процедуры определения α_φ дает возможность идентифицировать принятый в модели способ воспроизведения действия регулирующих стержней по экспериментальным данным. Он одновременно дает информацию об адекватности моделирования эффектов реактивности и действия запаздывающих нейтронов.

При воспроизведении этого опыта в модель задаются известные для данного реактора на данный момент значения коэффициентов реактивности. Пара-

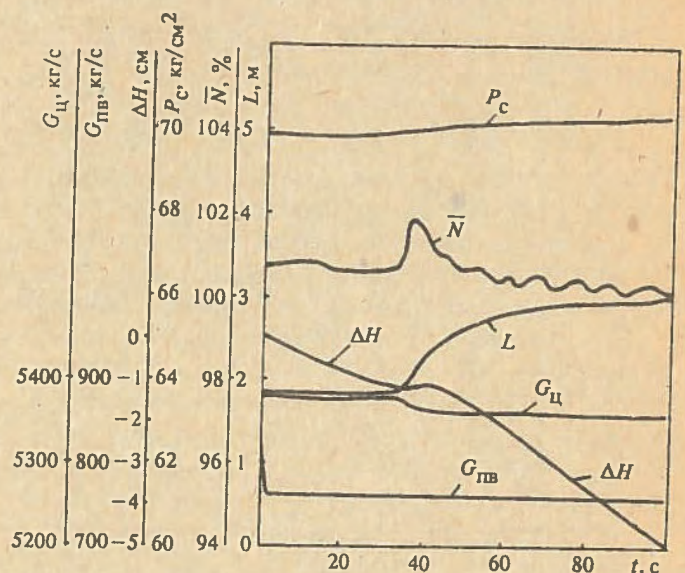


Рис. 3. Изменение во времени давления в барабанах-сепараторах (P_c), нейтронной мощности (\bar{N}), положения стержней АР (L), расхода циркуляционной ($G_{ц}$) и питательной ($G_{пв}$) воды и отклонения массового уровня от стационарного значения (ΔH) в опыте по определению α_φ с уменьшением расхода питательной воды

метры, количественно определяющие в модели приращение коэффициента размножения, вызванное перемещением стержня, задаются по результатам физического расчета эффектов замещения поглотителя на вытеснитель и воды на вытеснитель в ячейке со стержнем. По этим данным первый эффект составляет $50 + 70 \cdot 10^{-5}$ абсолютных единиц. Эффект замещения воды вытеснителем составляет 0,4 от этой величины.

При моделировании стержней в комплексе *TRIPOLY* воспроизведена реальная конструкция стержня, включая графитовый вытеснитель, "телескоп" и поглотитель из бористой стали. Длина "телескопа" (заполненный водой промежуток между поглотителем и вытеснителем) составляет 1,45 м. Погрешности в расчете эффекта замещения одного ядерного материала другим в ячейке со стержнем проявляются при идентификации сильнее, если эксперимент проводится в условиях существенного перекаса поля нейтронов по высоте реактора, когда значения потока на концах "телескопа" существенно отличаются.

С учетом этих соображений для идентификации был выбран опыт, проведенный на третьем блоке Чернобыльской АЭС. Имевший место в этом опыте перекас поля по высоте можно характеризовать отношением средних значений потока по верхней и нижней половинам реактора. Оно равнялось 1,25. При формировании исходного состояния модели была использована предусмотренная в комплексе *TRIPOLY* возможность задания объемного поля потока нейтронов по показаниям внутриреакторных датчиков.

Результаты реального и расчетного эксперимента представлены на рис. 4 в виде кривых изменения нейтронной мощности, вызванного заданным перемещением стержней АР. Хорошее совпадение этих кривых обеспечено подбором величины эффекта замены вытеснителя поглотителем. Приведенный результат получен при значении этого эффекта, равном $56 \cdot 10^{-5}$ абсолютных единиц. Оно лежит в пределах, предсказанных ячейным физрасчетом. Незначительные расхождения в пределах первых 10 ÷ 15 с переходного процесса можно объяснить тем, что в модели использовано одnogрупповое описание динамики выхода запаздывающих нейтронов. Хорошее совпадение начальной скорости изменения и установившегося значения отклонения мощности свидетельствует о том, что модель точно воспроизводит как эффект перемещения стержней, так и эффект действия "быстрых" мощностных обратных связей (совокупность плотностного и доплер-эффектов).

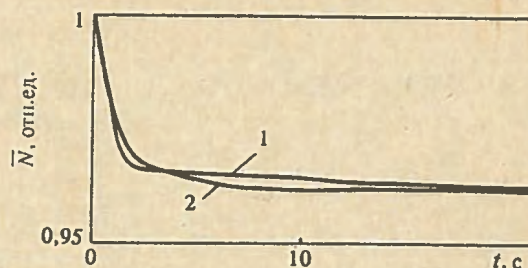


Рис. 4. Изменение во времени нейтронной мощности в опыте по "взвешиванию" стержней АР: 1 — расчет; 2 — эксперимент

Список литературы

1. Хитчок А. Устойчивость ядерных реакторов. М.: Госатомиздат, 1963.
2. О деформации поля энерговыделения в РБМК/А.Н. Алексаков, Б.А. Воронцов, И.Я. Емельянов и др. // Атомная энергия. 1979. Т. 46. Вып. 4. С. 227—232.
3. Синтез системы локальных автоматических регуляторов для энергетических реакторов/И.Я. Емельянов, Л.Н. Подлазов, А.Н. Алексаков и др. // Атомная энергия. 1982. Т. 53. Вып. 5. С. 299—303.
4. Расчетно-теоретические исследования системы ЛАР-БИК/А.Н. Алексаков, И.Я. Емельянов, Е.В. Николаев и др. // ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. М.: ЦНИИатоминформ. 1987. Вып. 7. С. 9—15.
5. Расчетные исследования действия регулятора мощности РБМК в режимах экстренного снижения мощности/А.Н. Алексаков, И.Я. Емельянов, Е.В. Николаев, Л.Н. Подлазов // Атомная энергия. 1986. Т. 60. Вып. 2. С. 91—95.
6. Некоторые вопросы контроля динамических характеристик реакторов Ленинградской АЭС/В.Я. Абакумов, А.Н. Алексаков, Б.А. Воронцов и др. // Атомные электрические станции. М.: Энергия. 1980. Вып. 3. С. 72—79.
7. Вопросы экспериментального изучения парового эффекта реактивности на реакторе РБМК Ленинградской АЭС/В.И. Рябов, А.Н. Алексаков, Б.А. Воронцов и др. // ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. М.: ЦНИИатоминформ. 1979. Вып. 4(8). С. 19—25.

Статья поступила в редакцию
25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер.
Физика ядерных реакторов., 1991, вып. 5, с. 30—37.

УПРОЩЕННАЯ МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОГИДРАВЛИКИ КОНТУРА ЦИРКУЛЯЦИИ КИПЯЩИХ РЕАКТОРОВ

А.Н. Алексаков, В.В. Захарова, В.Б. Павлов, Н.В. Рублева

Описывается математическая модель нестационарных процессов в контуре циркуляции кипящих реакторов, ориентированная на использование в составе комплексных моделей динамики установок с канальными реакторами.

A SIMPLIFIED MODEL OF NONSTATIONARY THERMOHYDRAULICS OF BOILING REACTOR CIRCULATION CIRCUIT. A.N. ALEKSAKOV, V.V. ZAKHAROVA, V.B. PAVLOV, N.V. RUBLEVA. A mathematical model of nonstationary processes in boiling reactor circulation circuit is described which is aimed at a use within the structure of complex dynamics models of plants with pressure tube reactors.

Моделирование нестационарных процессов в контуре циркуляции кипящих реакторов развивалось по двум основным направлениям. С одной стороны, разрабатывались модели, ориентированные специально на изучение процессов в двухфазных потоках, учитывающие максимум известных в этой области закономерностей. С другой стороны, в составе комплексных моделей процессов в реакторных установках динамические процессы в теплогидравлических компонентах оборудования установок воспроизводились в минимально необходимой степени. Подобие обеспечивалось по интегральным характеристикам (динамика уровня и давления в сепараторах, транспортные запаздывания и т.п.) с использованием искусственных приемов (например, включением объемов ПВК в точечную гомогенную модель сепаратора при расчете давления).

Модель, созданная авторами статьи, ориентирована на использование в составе комплексных моделей динамики установок с канальными реакторами. При этом в ней воспроизведены основные физические механизмы, определяющие термодинамические и механические параметры в потоке теплоносителя, распределенные по длине контура циркуляции. Описание включает четыре классических уравнения: неразрывности, количества движения, энергии и состояния. Уравнения записаны в предположении о гомогенности потока и равновесности тепломассообмена между фазами. Скольжение фаз и эффект пристеночного кипения учитываются в виде эмпирических поправок в уравнении состояния. Для решения поставленной задачи разработана простая и эффективная численная схема.

В схеме расчета переменных в данной (i -й) точке контура на данном (k -м) слое по времени (рис. 1) следует обратить внимание на процедуру расчета энтальпии. Процедура определяет, из какой точки по z за время Δt переместилась в данную точку энтальпия, эпюра которой по z рассчитана для предыдущего слоя по времени. Величина сдвига определяется по скорости движения среды в данной точке. К определенной таким образом энтальпии добавляется порция тепла, посту-

пившая в движущуюся среду за время Δt с тепловым потоком извне контура.

В модели нестационарной теплогидравлики данные, описывающие геометрию гидравлического контура, задаются в виде табличных зависимостей площади проходного сечения и синуса угла наклона к горизонту по длине контура. Все гидравлические потери представляются в виде потерь на трение. Считается, что эти потери равномерно распределены по выделенным характерным участкам контура.

Статика нестационарной модели настраивается подбором величины гидравлического сопротивления при заданном расходе так, чтобы давления в точках стыковки выделенных участков контура совпадали с подробным статическим расчетом. Расчеты номинального статического режима в обоснование конструкции установки проводятся на самых начальных стадиях проектирования и к моменту начала исследований динамики установки статический режим гидравлического контура обычно хорошо известен. Подобранные таким образом сопротивления в динамических расчетах и при оформлении исходной статике, отличающейся от номинальной, представляются, как и геометрические характеристики, в виде табличной зависимости по длине контура.

Направление обхода контура в расчете не играет существенной роли. Принято, что направление обхода совпадает с направлением движения среды в исходной статике.

Граничные условия оформляются следующим образом. В первой по порядку обхода точке задаются давление и энтальпия среды, поступающей в гидравлический контур. По окончании цикла расчета по длине контура давление в последней точке сравнивается с давлением, заданным в качестве внешнего условия на этой границе контура. Если эти два давления с заданной точностью совпадают, процедура переходит к расчету следующего шага по времени, если обнаружено несовпадение (например, давление в последней точке больше граничного условия), процедура возвращается к первой точке и стартует с измененным расходом (дается положительная добавка, пропорциональная раз-

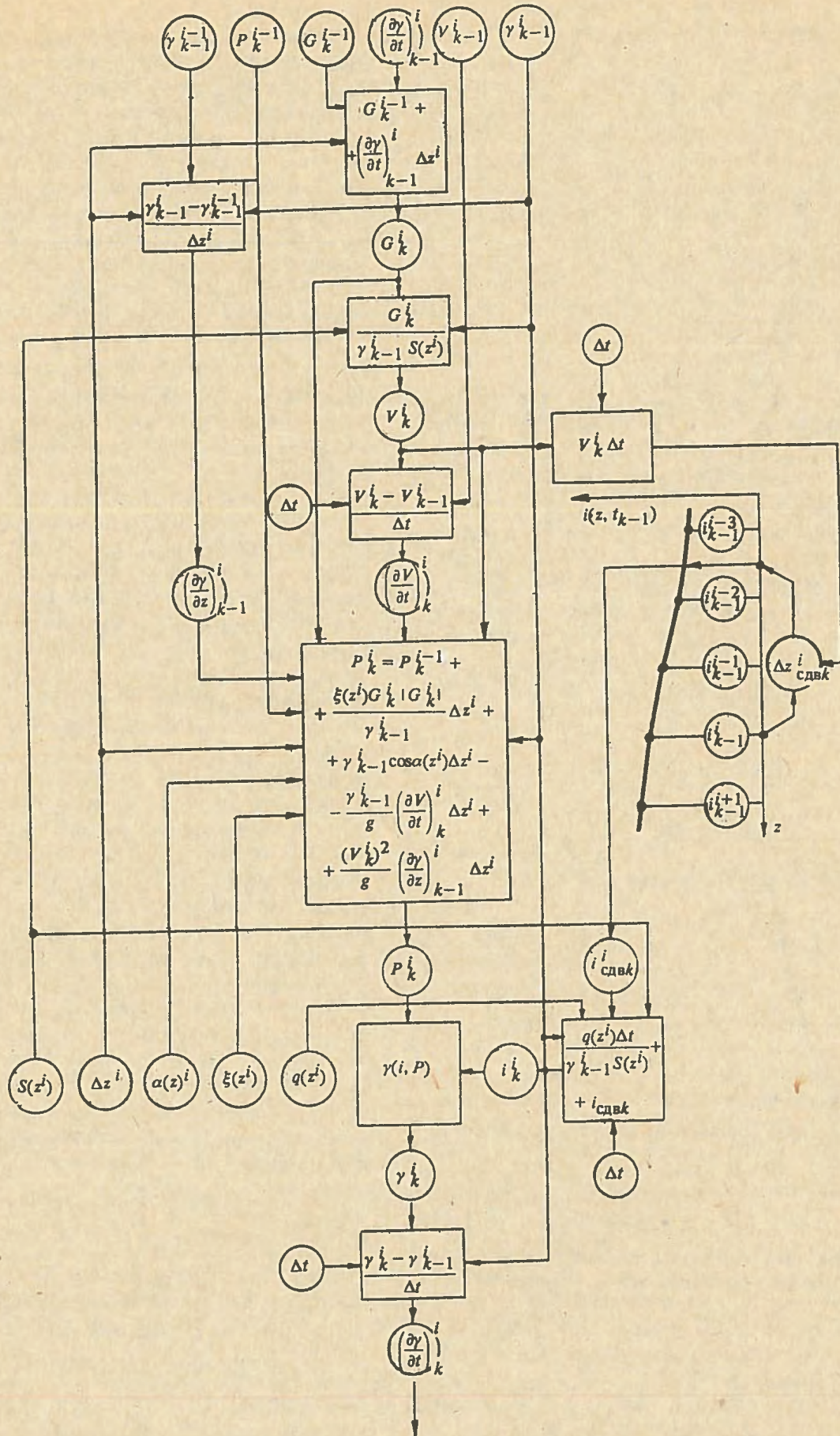


Рис. 1. Схема расчета переменных в данной (i -й) точке контура на данном (k -м) слое по времени: γ — плотность теплоносителя; P — давление; G — расход теплоносителя; V — скорость теплоносителя; S — сечение трубопроводов; i — энтальпия; Δz — шаг по длине контура; Δt — шаг по времени; α — угол наклона оси контура к горизонту; ξ — удельное сопротивление; q — удельная мощность канала

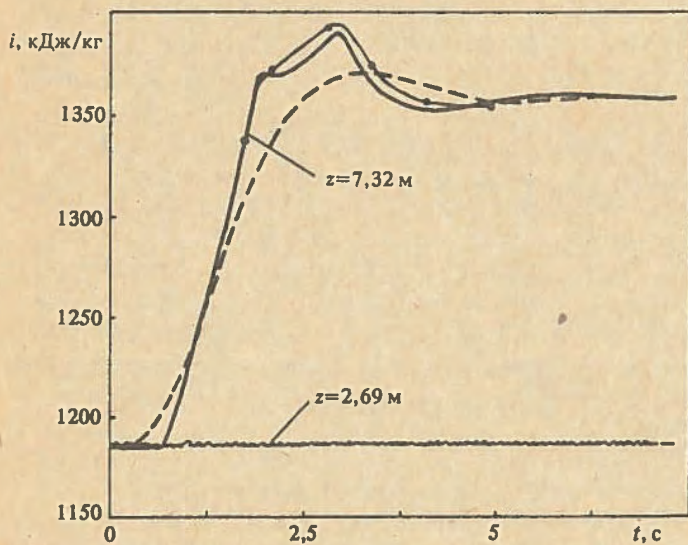
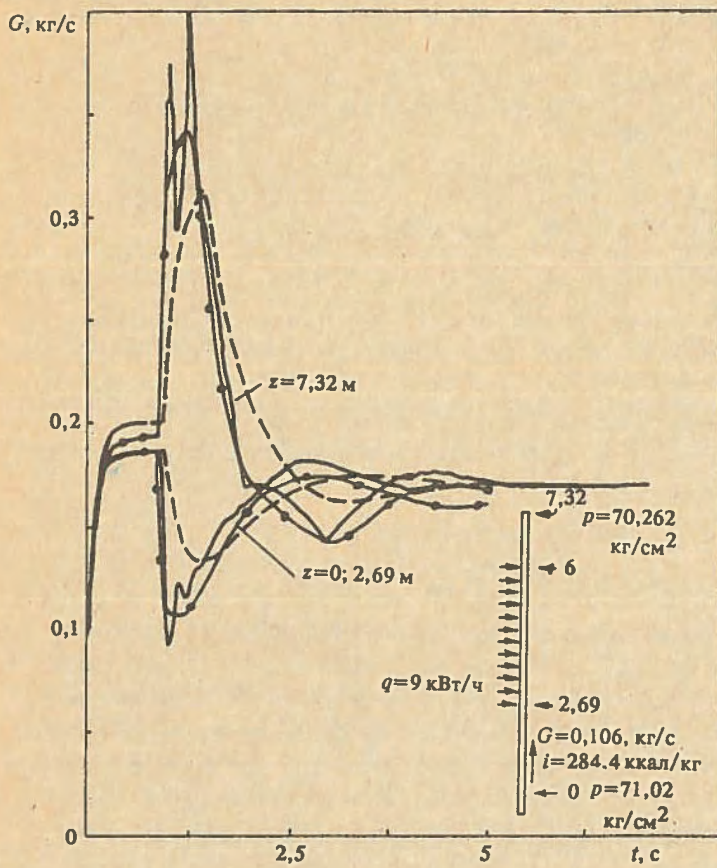


Рис. 2. Расчетная схема стандартной задачи и результаты расчета поведения массового расхода (а) и энтальпии (б) во времени: — программа МЕСА; - - - RAMA; —●— BAZAR

ности давлений). Итерации по расходу заканчиваются, когда давления совпадут с заданной точностью.

Чтобы получить сведения о точности разработанной схемы, была решена стандартная задача из ряда задач, применяемых в международной практике для аттестации методов расчета нестационарной теплогидравлики. Эта задача поставлена следующим образом: задано давление на обоих концах вертикальной трубы так, что в исходном состоянии вода движется вверх. Переходный процесс возбуждается за счет изменения перепада давлений и, одновременно, мгновенного подвода мощности, равномерно распределенной по длине обогреваемого участка. Условия этой задачи по давлению и энтальпии близки к условиям, характерным для петель отечественных канальных реакторов. Расчетная схема задачи вместе с числовыми данными приведена на рис. 2 (результаты решения этой задачи см. в кн.: Hancock W.P., Banerjee S. Numerical standards for flow boiling analysis // Nucl. Sci. Eng. 1977. Vol. 64. No 1. P. 106). В этой работе основные положения постановки задачи совпадают с принятой в данной работе постановкой. Сравниваются решения этой задачи, полученные по программе МЕСА, дающей практически идеальное решение уравнений, с программой RAMA, реализующей гораздо более простую численную схему, и с программой BAZAR, реализующей схему, разработанную авторами данной статьи. Нетрудно убедиться, что результат, полученный по программе BAZAR, хорошо совпадает с результатом, полученным по программе МЕСА. Из этого сравнения можно заключить, что примененная в BAZAR численная схема обладает достаточной точностью.

На вычислительной технике мощностью около 4 MIPS (EC-1066) при решении уравнений одноканальной модели петли циркуляции реактора на единицу времени процесса тратится около 7 единиц процессорного времени. Рассматриваются возможности ускорения вычислений.

Анализ процессов в контуре циркуляции при воспроизведении на модели реальных технологических режимов помогает сформировать правильное и глубокое понимание особенностей поведения реакторной установки, связанных с динамикой процессов в контуре. Оснащение программы средствами отображения и диалога позволит создать хорошее учебное пособие для подготовки персонала управления.

Статья поступила в редакцию
25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер.
Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 38—40.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПАРОГЕНЕРИРУЮЩЕМ КАНАЛЕ

Т.Ю. Сахарова, А.И. Ионов

Рассматривается задача моделирования нестационарного потока теплоносителя в составе полномасштабной модели канального реактора.

MODELLING THERMOHYDRODYNAMIC PROCESSES IN STEAM-GENERATING CHANNEL. T.Yu. SAKHAROVA, A.I. IONOV. A problem of modelling a non-stationary coolant flow within the structure of a full-scale model of channel reactor is considered.

Расчетные и экспериментальные исследования динамических свойств реакторов больших физических размеров типа РБМК и работы по анализу их поведения при глубоких изменениях параметров, развернувшиеся после аварии на Чернобыльской АЭС, убедительно показали необходимость использования полномасштабных трехмерных математических моделей динамики активных зон таких реакторов для корректного анализа и изучения условий безопасности. В связи с этим одной из важных задач является создание модели, описывающей теплогидродинамические процессы в парогенерирующем канале и удовлетворяющей следующим противоречивым требованиям: она должна быть достаточно простой, чтобы ввод ее в полномасштабную модель не привел к сильному увеличению затрат машинного времени, и вместе с тем она должна достаточно точно описывать широкий класс нестационарных процессов в технологическом канале.

Расчетно-методические исследования показали, что таким требованиям удовлетворяет гомогенная модель одномерного течения двухфазного теплоносителя с эмпирическими поправками на неравновесность и проскальзывание фаз. В принятой модели одномерное движение гомогенного теплоносителя описывается тремя уравнениями сохранения массы, импульса и энергии:

$$S \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{G^2}{S\rho} \right) = -S \frac{\partial P}{\partial z} - \tau_k \Pi - g\rho S \sin \vartheta; \quad (2)$$

$$S \frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \frac{\partial(G i)}{\partial z} = Q \Pi, \quad (3)$$

где ρ — плотность гомогенного теплоносителя; G — расход теплоносителя; P — давление; i — энтальпия; S — площадь проходного сечения; Π — периметр сечения канала; τ_k — касательное напряжение трения; g — ускорение свободного падения; Q — удельный тепловой поток; ϑ — угол между горизонталью и осью канала.

Уравнение состояния пароводяной смеси задается эмпирическими соотношениями для удельного объема $V = 1/\rho$, $V = V(i, P)$. Эти соотношения построены та-

ким образом, что в них учитываются эффекты поверхностного кипения и проскальзывания фаз.

В уравнении (2) описывающий потери на трение член $\tau_k \Pi$ заменяется эмпирическим соотношением $\xi G |G| V$, где ξ — коэффициент, зависящий от геометрии канала, местного сопротивления и вязкости теплоносителя.

После преобразования уравнения сохранения энергии (3) с учетом уравнения неразрывности (1) и перехода от плотности ρ к удельному объему V система (1)—(3) примет вид

$$\frac{\partial G}{\partial z} = \frac{S}{V^2} \left(\frac{\partial V}{\partial i} \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} \right); \quad (4)$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} = -S \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{G^2 V}{S} \right) - \xi G |G| V - \frac{g S \sin \vartheta}{V}; \quad (5)$$

$$\frac{S}{V} \frac{\partial i}{\partial t} + G \frac{\partial i}{\partial z} = Q \Pi. \quad (6)$$

Граничные условия для уравнений (4), (5) могут быть двух типов:

$P(t, z)|_{z=0} = P_{\text{int}}$, $P(t, z)|_{z=L} = P_{\text{out}}$ — перепад давления на канале;

$G(t, z)|_{z=0} = G_{\text{int}}$, $P(t, z)|_{z=L} = P_{\text{out}}$ (L — длина канала) — расход на входе, давление на выходе.

При постановке задачи учитывалась возможность опрокидывания течения как на отдельных участках, так и в целом контуре. С учетом этого граничные условия для уравнения (6) задавались следующим образом:

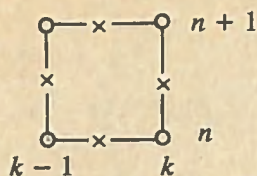
$$i(t, z)|_{z=0} = i_{\text{int}}, \quad G(t, z)|_{0 < z < L} > 0;$$

$$i(t, z)|_{z=L} = i_{\text{out}}, \quad G(t, z)|_{0 < z < L} < 0;$$

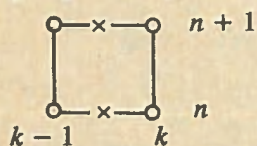
$$i(t, z)|_{z=z_*} = i_*, \quad G(t, z)|_{z < z_*} < 0,$$

$$G(t, z)|_{z > z_*} > 0 \quad (z_* — точка опрокидывания).$$

Для решения дифференциальных уравнений (4)—(6) в качестве независимых переменных выбраны давление, расход и энтальпия. Уравнения (4)—(6) аппроксимируются разностными уравнениями. Для этого канал разбивается на N участков; границы участков дают $N + 1$ пространственный узел сетки. Сеточные шаблоны имеют вид



— для уравнения (6);



— для уравнений (4) и (5).

Здесь k — номер узла сетки по пространству, n — по времени.

Полученная таким образом разностная схема неявная, кроме того, она симметрична по пространству.

Статические значения параметров P , G , i определяются из условий равенства нулю производных по времени.

В ряде практических задач для расчета статики необходимо задать перепад давлений и расход на входе в качестве граничных условий для (4) и (5), т.е. система получается переопределенной, поэтому для обеспечения соответствия распределения параметров заданным условиям пересчитывается коэффициент сопротивления ξ (см. (5)) на первом участке.

При переходе к расчету динамики вычисление проводится по следующей схеме.

В силу существенной нелинейности уравнений на каждом временном шаге организуется итерационный процесс. В качестве нулевой итерации берутся значения G , P , i , V от предыдущего временного шага.

На каждом шаге итераций в первую очередь решается уравнение (6), из которого определяется распределение энтальпии по длине канала. С новыми значениями энтальпии пересчитываются значения V , $\partial V/\partial P$, $\partial V/\partial i$, входящие в коэффициенты уравнений (4), (5).

Уравнения (4) и (5) решаются совместно (сеточные шаблоны соответствующих им разностных уравнений одинаковы). Квадраты расхода в уравнении (5) расписываются как произведения значений расхода на предыдущей и последующей итерациях: $G_j^2 = G_j G_{j-1}$, j — номер итерации. Таким образом, на каждом итерационном шаге имеем линейную систему уравнений для давления вида:

$$P_0 = P_{\text{int}} \quad (\text{или } P_0 = UP_1 + W);$$

$$AP_{k-1} + BP_k + CP_{k+1} = D, \quad k = 1, N-1;$$

$$P_N = P_{\text{out}}$$

Такую систему удобно решать методом прогонки. По вычисленным значениям давления определяется расход в каждой расчетной точке.

Если отличие значений давления на двух последних итерациях не превышает заданного значения ϵ , то осуществляется переход к расчету нового временного шага, иначе итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность.

По программе *DIPARK*, реализующей изложенный алгоритм, были проведены тестовые расчеты. Результаты расчетов по стандартному международному тесту № 1¹⁾ приведены на рис 1—4.

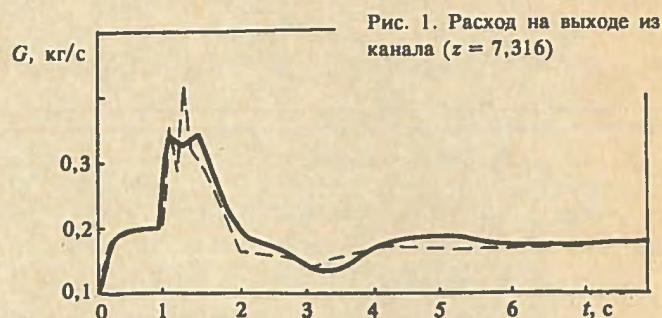


Рис. 1. Расход на выходе из канала ($z = 7,316$)

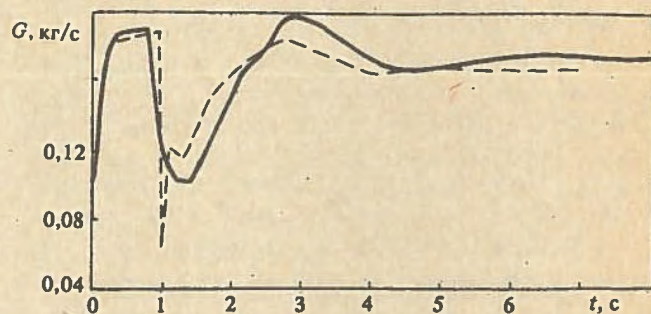


Рис. 2. Расход на входе в обогреваемый участок ($z = 2,690$)

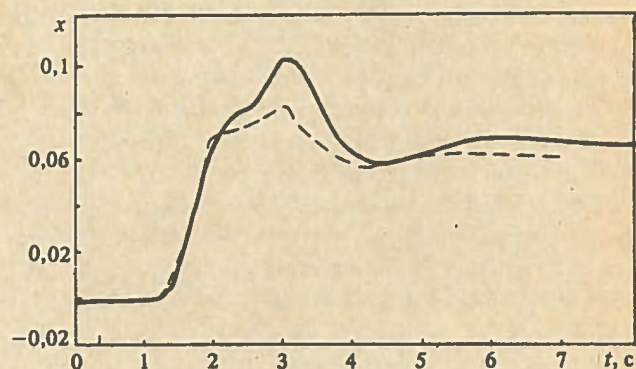


Рис. 3. Весовое паросодержание на выходе из канала ($z = 7,316$)

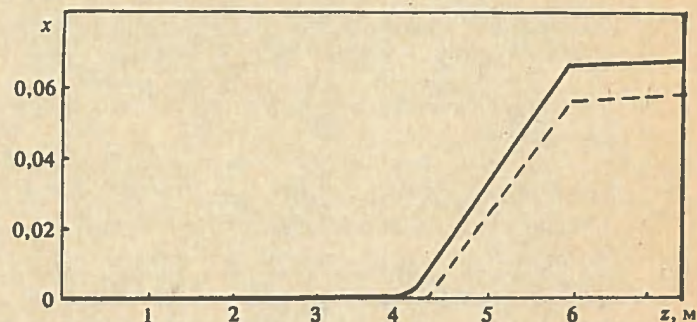


Рис. 4. Распределение весового паросодержания по длине канала через 7 с после возмущения

¹⁾ См.: Hancox W.P., Banerjee S. Numerical standards for flow boiling analysis//Nucl. Sci. Eng. 1977. Vol. 64. № 1. P. 106—123.

Стандартный тест № 1.

По вертикальной трубе снизу вверх течет теплоноситель. Начальные и граничные условия заданы следующим образом:

$$\begin{aligned}t = 0 \quad G(z) &= 0,0106 \text{ кг/с}, \quad 0 < z < L; \\i(z) &= 1184,7 \text{ кДж/кг}, \quad 0 < z < L; \\P(0) &= 7,102 \text{ МПа}; \\P(L) &= 6,984 \text{ МПа}; \\P(z) &= P(0) - z/L \cdot (P(0) - P(L)), \quad 0 < z < L. \\t > 0 \quad P(0) &= 7,102 \text{ МПа}; \\P(L) &= 6,984 \text{ МПа}; \\i(0) &= 1184,7 \text{ кДж/кг}; \\Q &= \begin{cases} 0,0 \text{ кВт/м} & 0 < z < 2,69 \text{ м}; \\ 9,0 \text{ кВт/м} & 2,69 \text{ м} < z < 5,971 \text{ м}; \\ 0,0 \text{ кВт/м} & 5,971 \text{ м} < z < L. \end{cases}\end{aligned}$$

Параметры канала:

$$L = 7,316 \text{ м}; \quad f = 0,005;$$

$$\begin{aligned}D_g &= 4,33 \text{ мм}; \\S &= 127 \text{ мм}^2; \\K/l &= \begin{cases} 0,0 \text{ м}^{-1} & 0 < z < 1,181 \text{ м}; \\ 1,31 \text{ м}^{-1} & 1,181 \text{ м} < z < 2,69 \text{ м}; \\ 1,52 \text{ м}^{-1} & 2,69 \text{ м} < z < 7,316 \text{ м}; \end{cases} \\K/l &\text{ — распределенное местное сопротивление.}\end{aligned}$$

В начальный момент по каналу течет жидкость, тепло не подводится, давление распределено линейно по длине канала. После мгновенного наброса мощности на центральном участке канала примерно через 7 с устанавливается новая статика, при которой кипение теплоносителя начинается на расстоянии ~ 4 м от входа в канал. Пунктиром на рис. 1—4 изображены расчеты по программе *MECA*¹⁾, достаточно точно описывающей движение потока, в котором жидкая и паровая фазы имеют равные скорости и равные температуры (модель *EVET*). Сплошной линией изображены результаты расчетов по программе *DIPARK*.

Для расчета 1 с процесса с шагом 0,01 с потребовалось 12 с процессорного времени на машине *IBM PC/AT*.

Этот тест показал, что предложенный алгоритм обладает консервативными свойствами.

Статья поступила в редакцию
25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер.
Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 41—43.

УДК 621.039.534.25

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА РАЗРЫВА ПАРОВОГО КОЛЛЕКТОРА ПАРОГЕНЕРАТОРА С УЧЕТОМ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

О.Ю.Кавун, Г.С. Таранов, М.Б. Мальцев, А.Ю. Никитин

Описываются расчетные схемы установки и использованная в расчетах методика. Приводятся результаты расчетов разрыва парового коллектора с наложением полного обесточивания, с использованием трехмерной двухгрупповой активной зоны.

MODELLING A MODE OF STEAM-GENERATOR STEAM HEADER DISRUPTURE TAKING CORE THREE-DIMENSIONAL MODEL INTO ACCOUNT. O. Yu. KAVUN, G.S. TARANOV, M.B. MALTSEV, A.Yu. NIKITIN. Plant calculation procedures and methods used throughout the calculations are described. Results of calculating the steam header rupture with complete de-energizing using the three-dimensional two-group core are suggested.

Одним из режимов, влияющих на безопасность реакторной установки, является режим разрыва парового коллектора парогенератора в неотсекаемой его части.

Для больших активных зон, например у реакторов типа ВВЭР-1000, существенное влияние на энерговыделение оказывают пространственные эффекты в активной зоне. Расчетные результаты, полученные по усредненным характеристикам и по пространственной модели, могут значительно отличаться. При этом динамика локального энерговыделения может вести себя иначе, чем динамика среднего энерговыделения по зоне.

Для учета пространственных эффектов при моделировании динамических и аварийных режимов в реакторных установках был разработан программный комплекс РАДУГА, в котором используется трехмерная двухгрупповая модель активной зоны.

Методика. Расчетная схема первого контура реакторной установки (рис. 1) соответствует схеме первого контура ВВЭР и АСТ. Контур циркуляции может содержать до шести циркуляционных петель, в каждой из которых имеются теплообменники (ТО) с парогенератором в модели ВВЭР либо с прямоточным теп-

¹⁾ См.: Hancox W.P., Banerjee S. Numerical standarts for flow boiling analysis//Nucl. Sci. Eng. 1977. Vol. 64. № 1. P. 106—123.

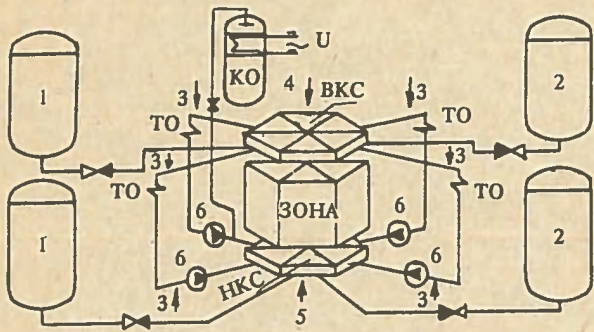


Рис. 1. Расчетная схема установки: 1 — гидроемкости первой ступени; 2 — гидроемкости второй ступени; 3 — подпитки в петли; 4 — подпитка в ВКС; 5 — подпитка в НКС; 6 — ГЦН

лообменником в модели АСТ, главный циркуляционный насос (6). Предусмотрены также различного рода подпитки (3) и возможность образования по одной течи в каждой петле либо в атмосферу (защитную оболочку), либо во второй контур. Критический расход течи для двухфазной среды вычисляется по методике Мууди [1]. Каждая расчетная петля может содержать до 20 расчетных узлов. К первой циркуляционной петле подсоединен компенсатор объема (КО) (в модели АСТ КО подсоединен непосредственно к верхней камере смещения (ВКС)). Расчетная схема КО содержит три объема. В паровом объеме может присутствовать неконденсирующийся газ. Система впрыска подсоединена к напору ГЦН одной из петель.

Для учета эффектов неполного перемешивания теплоносителя нижняя (НКС) и верхняя камеры смещения разбиты на шесть секторов. Каждому сектору камер смещения соответствует своя группа каналов активной зоны и доля расхода каждой из петель, поступающая в этот сектор. Доли расходов задаются в исходных данных. Использование экспериментальных значений по долям расходов от петель к каждому из секторов позволяет учесть эффекты неперемешивания с достаточно хорошей степенью точности.

Активная зона моделируется в трехмерном приближении. Максимальное число каналов может достигать 397, каждый канал может быть разбит до 35 расчетных узлов по высоте, при этом максимальное число расчетных элементов не должно превышать 5691. Активная зона моделируется каналами в виде правильных шестигранников. Библиотека нейтронно-физических констант готовится с использованием программного комплекса на базе программ УНИРАСОС и НИ-7000.

При моделировании полей энерговыделения в активной зоне используется двухгрупповое диффузионное уравнение кинетики с шестью группами запаздывающих нейтронов и шестью группами источников остаточного энерговыделения.

Уравнения кинетики имеют следующий вид:

$$\frac{1}{V_1} \frac{\partial F_1}{\partial \tau} = \text{div}(D_1 \text{grad} F_1) + (1 - \beta) \Psi - F_1 (\Sigma_{a1} + \Sigma_{12}) +$$

$$+ \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \text{ — для быстрой группы;}$$

$$\frac{1}{V_2} \frac{\partial F_2}{\partial \tau} = \text{div}(D_2 \text{grad} F_2) + F_1 \Sigma_{12} - F_2 \Sigma_{a2} \text{ — для тепловой группы;}$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = \beta_i \Psi - \lambda_i C_i \text{ — для запаздывающих нейтронов,}$$

где V — скорости нейтронов; F — потоки нейтронов; D — коэффициенты диффузии; $\beta = \sum \beta_i$ — доля запаздывающих нейтронов; $\Psi = \nu_1 F_1 \Sigma_f + \nu_2 F_2 \Sigma_f$ — источник нейтронов деления; Σ_a — сечение поглощения; Σ_{12} — сечение перевода из быстрой в тепловую группу; λ — постоянная распада источников запаздывающих нейтронов; C — концентрация источников запаздывающих нейтронов; ν — выход нейтронов на акт деления; Σ_f — сечение деления; индексы 1, 2 относятся к быстрым и тепловым нейтронам соответственно.

Уравнение источников энерговыделения записывается в следующем виде:

$$Q_{(2)} = \langle Q \rangle (1 - \delta) \frac{\Psi_{(2)}}{\langle \Psi_0 \rangle} + \sum \mu_i L_i \frac{\Psi_{0(2)}}{\langle \Psi_0 \rangle}.$$

Источники остаточных энерговыделений имеют вид

$$\frac{\partial \mu_i}{\partial \tau} = \frac{\langle \Psi \rangle}{\langle \Psi_0 \rangle} \delta_i - L_i \mu_i,$$

где индекс 0 относится к начальному моменту времени; $\langle \Psi \rangle = \int \Psi_{(2)} dr / \int V dz$; δ — доля остаточных энерговыделений; L — постоянная распада источников остаточного энерговыделения; μ — относительная концентрация источников остаточных энерговыделений.

Решение диффузионного уравнения кинетики осуществляется методом сеток с использованием метода верхней релаксации. Разностная схема представлена на рис. 2.

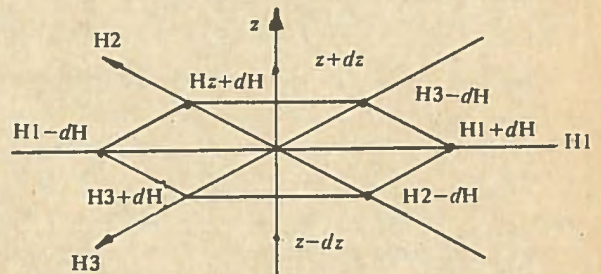


Рис. 2. Сеточный шаблон

В программе используются уравнения движения и энергии в приближении гомогенной несжимаемой жидкости в одномерном (по каналу) приближении.

Система уравнений движения имеет вид

$$\Sigma \frac{L_i}{f_i} \frac{\partial G_i}{\partial \tau} = P_1 - P_2 - \Sigma \rho g h_i - \Sigma \frac{\xi}{2\rho f_i^2} G_i |G_i|;$$

$$\Sigma \frac{L_j}{f_j} \frac{\partial G_j}{\partial \tau} = P_3 - P_1 - \Sigma \rho g h_j - \Sigma \frac{\xi}{2\rho f_j^2} G_j |G_j| + \Delta P_n;$$

$$\Sigma \frac{L_0}{f_0} \frac{\partial G_0}{\partial \tau} = P_2 - P_3 - \Sigma \rho g h_0 - \Sigma \frac{\xi}{2\rho f_j^2} G_0 |G_0|;$$

$$\Sigma G_j = \Sigma G_i;$$

$$\Sigma G_i = G_0;$$

$$P_3 = P_{k0},$$

где индексы $i, j, 0$ относятся к каналам активной зоны, к циркуляционным петлям, к общему тяговому участку соответственно; $\Sigma \frac{L}{f}$ — сумма отношений длин участков к их проходным сечениям; P — в соответствии с рис. 1 давления в НКС, над активной зоной, в верхней части ВКС; $\Sigma \rho g h$ — сумма гидростатических напоров; $\Sigma \frac{\xi}{2\rho f^2}$ — сумма отношений коэффициентов гидравлических сопротивлений участков к удвоенному произведению плотности на квадрат проходного сечения; ΔP_n — напор насоса.

Данная система уравнений преобразуется в систему уравнений относительно давлений в узлах P1 и P2.

Уравнения энергии для гомогенной несжимаемой жидкости для расчетных узлов имеют вид

$$M \frac{\partial H}{\partial \tau} = \Sigma G_{\text{вх}} H_{\text{вх}} - \Sigma G_{\text{вых}} H + Q,$$

где M — масса узла петли (канала); H — энтальпия узла; $H_{\text{вх}}$ — энтальпия в соседних узлах; $G_{\text{вх}}$ — расходы, входящие в узел; $G_{\text{вых}}$ — расходы, выходящие из узла; Q — тепло, подводимое к узлу.

В модели также учтены неравновесное кипение в каналах активной зоны и сепарация пара в ВКС. Расчетная схема второго контура АСТ соответствует проекту АСТ-500. Методика решения уравнений движения и энергии аналогична уравнениям для первого контура. Модель теплогидравлических процессов в парогенераторах аналогична используемой в программе ДИНАМИКА [2]. Кроме того, в расчетной модели учитываются системы пассивного отвода тепла от парогенератора к атмосферному воздуху.

Верификация программы. Термогидравлический модуль программы проверялся как в стационарных, так и в динамических режимах с использованием программы ДИНАМИКА [2] и ряда других. Верификация модуля кинетики осуществлялась в стационарном режиме с использованием программы НИ-7000. Отклонение полей энерговыделения в наиболее напряженном сечении по высоте реактора, полученное по про-

граммам НИ-7000 и РАДУГА, не превышает 5%. Результаты моделирования процессов разгона на запаздывающих и мгновенных нейтронах сопоставлялись с аналитическим решением.

Для оценки применимости программы при расчете малых течей произведено сопоставление с расчетом течи Ду-80, выполненным по программе ATHLET [3]. Сопоставление результатов расчетов по программному комплексу РАДУГА и программе ALHLET (рис. 3) показывает, что основные характеристики в реакторной установке, включая состояние активной зоны, полученные по этим программам, не имеют существенных отличий.

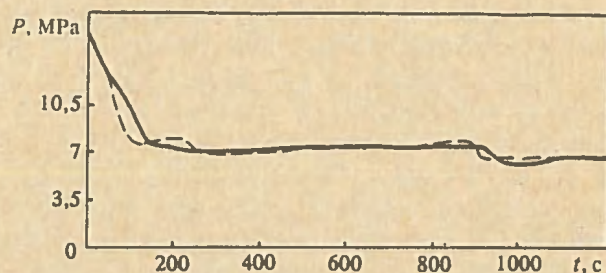


Рис. 3. Сравнение давления в первом контуре при течи Ду-80 по программам РАДУГА (сплошная кривая) и ATHLET (пунктирная кривая)

Расчет разрыва парового коллектора парогенератора. При расчете режима разрыва парового коллектора с резким захлаживанием теплоносителя по аварийной петле существенными являются следующие факторы:

- глубина выгорания топлива;
- начальное положение органов СУЗ и глубина выгорания поглотителя в стержнях СУЗ;
- наложение дополнительных отказов в работе системы регулирования;
- правильный учет перемешивания теплоносителя в камерах смешения реактора.

Моделирование данного режима проводилось для двух моментов кампании реактора: для начал кампании первой топливной загрузки и в конце кампании для установившегося режима перегрузок.

Для начала кампании были проведены расчеты исходя из следующих предположений:

- с моментом разрыва парового коллектора совпадает полное обесточивание станции;
- по полному обесточиванию срабатывает АЗ1;
- отказывает наиболее эффективный стержень СУЗ, вводимый в "холодный" сектор зоны;
- доли расходов в камеры смешения, приведенные в таблице, соответствуют максимально возможному перемешиванию теплоносителя в камерах смешения;
- разрыв парового коллектора происходит на парогенераторе первой петли.

Доли расходов в камеры смешения

Номер петли	Сектор камеры смешения					
	1	2	3	4	5	6
1	0,6667	0,1667	0,0	0,0	0,0	0,1667
2	0,0	0,5000	0,5000	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,1667	0,6667	0,1667	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5000	0,5000

Расчет режима проводился до 60-й секунды. Относительная нейтронная мощность представлена на рис. 4. Как видим, застревание органа СУЗ и сильное захлаживание сектора активной зоны не помешало обеспечению глубокой подкритичности реактора. Энтальпия теплоносителя на входе в наиболее холодный и горячий секторы зоны представлена на рис. 5.

На рис. 6 показаны относительные мощности касет для моментов времени 0 и 30 с. Для лучшей демонстрации довольно слабого пространственного эффекта масштаб каждого графика выбран безотносительно к энерговыделению на начало процесса, а также представлены поля энерговыделения в двух различных проекциях. Виден перекося энерговыделения, связанный с захлаживанием теплоносителя, а также пик энерговыделения в кассете, в которую не введен орган СУЗ.

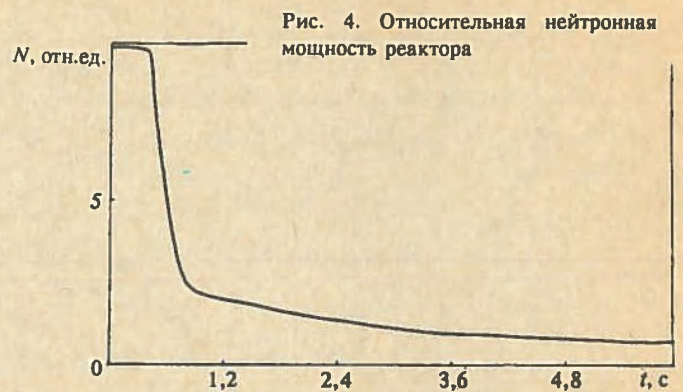


Рис. 4. Относительная нейтронная мощность реактора

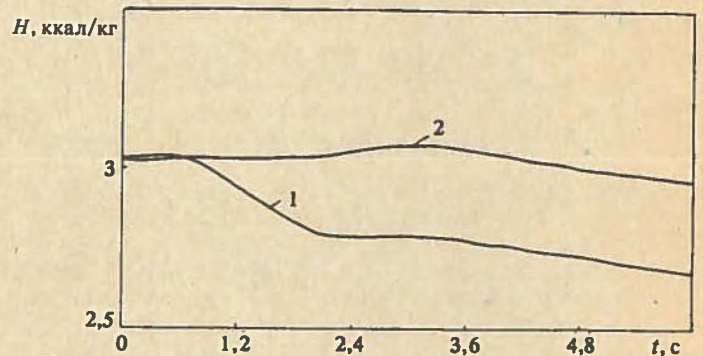


Рис. 5. Энтальпия теплоносителя на входе в наиболее холодный (1) и горячий (2) секторы зоны

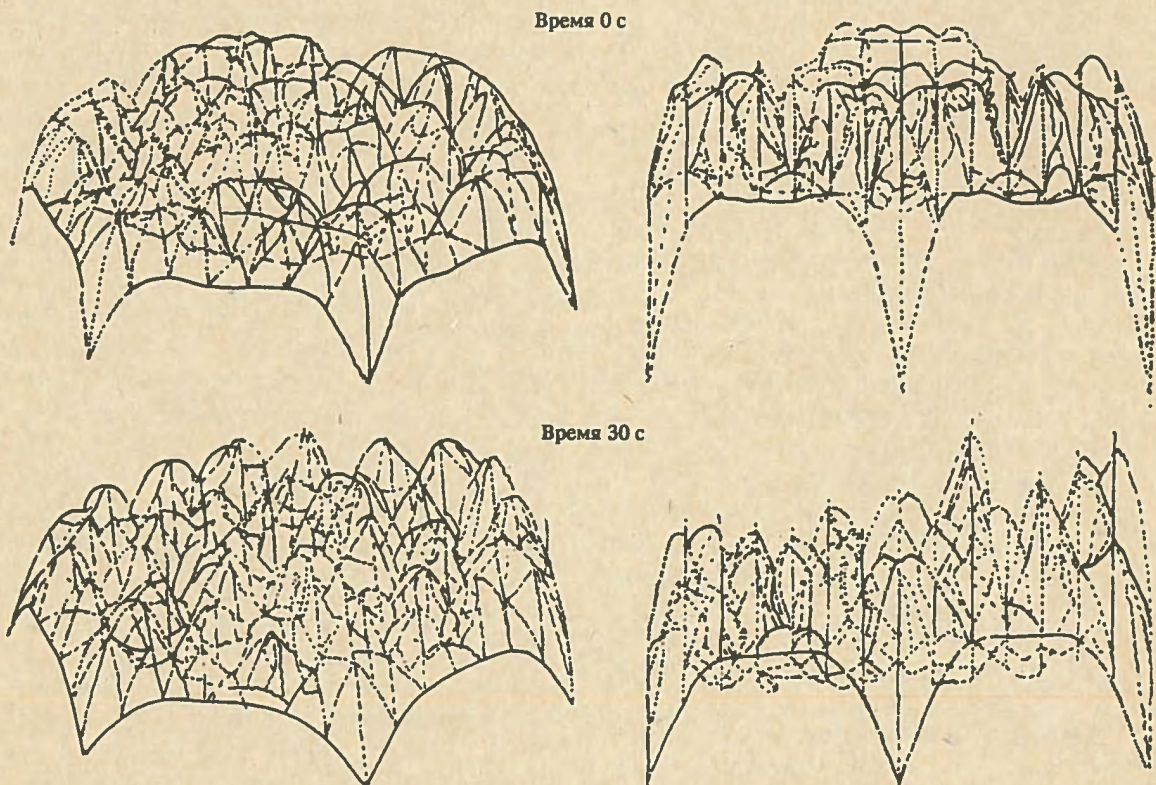


Рис. 6. Относительная мощность касет

Для конца кампании топлива рассмотрены максимально возможные консервативные допущения (помимо допущений для режима на начало кампании):

— на момент аварии в активную зону введена наиболее эффективная группа СУЗ;
— имеет место 50%-ное выгорание поглотителя в стержнях СУЗ;

— для компенсации реактивности подается борный раствор в НКС.

Результаты расчета мощности энерговыделения представлены на рис. 7.

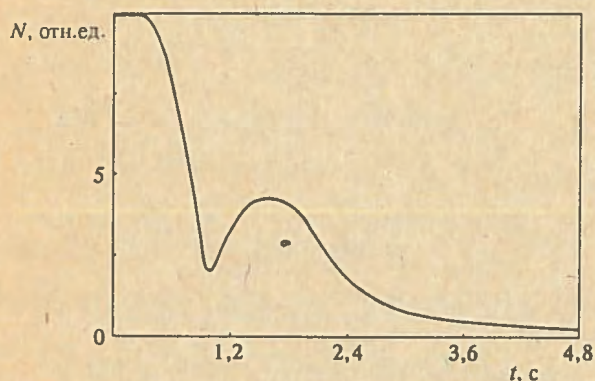


Рис. 7. Мощность энерговыделения

Заключение

Программный комплекс РАДУГА может быть использован в моделирующих и тренажерных системах при анализе безопасности РУ.

УДК 621.039.5

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПОЛНОМАСШТАБНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ ПОЛЕЙ НЕЙТРОНОВ В РЕАКТОРЕ

А.М. Афанасьев, А.А. Афанасьева

Предлагается быстродействующий алгоритм расчета в трехмерной геометрии изменений полномасштабных полей нейтронов, возникающих после перемещения стержней управления, перегрузки каналов и т.д. Достигнутое быстродействие позволяет использовать этот алгоритм при разборке матобеспечения тренажера.

A FAST ALGORITHM FOR CALCULATING FULL-SCALE THREE-DIMENSIONAL NEUTRON FIELDS IN A REACTOR. A.M. AFANASYEV, A.A. AFANASYEVA. A fast algorithm is proposed for calculating the variation of full-scale neutron fields observed after control rod displacement, channel overload, etc. The fast action attained allows one to use this algorithm when studying simulator's software.

Рассматривается один из вопросов создания матобеспечения тренажера, связанный с разработкой быстродействующего алгоритма расчета изменения поля нейтронов в реакторе после локального ввода реактивности, вызванных, например, перемещением оператором стержней управления (СУ), перегрузкой топлива и т.д.

Расчеты по программному комплексу РАДУГА такого жесткого аварийного режима для РУ с ВВЭР-1000, как разрыв парового коллектора с наложением полного обесточивания, показали высокую надежность систем безопасности. Однако следует учитывать принципиальную возможность сохранения реакторной установки в критическом состоянии в случае протекания подобного режима в конце кампании топлива при условии наложения отказа одного из органов СУЗ с выгоранием ПЭЛ при их длительной эксплуатации. Для исключения подобных ситуаций целесообразно включать одновременно с АЗ1 насосы высокого давления для подачи борной кислоты в НКС.

Список литературы

1. Муди Ф. Максимальный расход двухфазного потока при истечении из резервуара через трубки//Тр. Америк. об-ва инж.-мех. Сер. Ф. Теплопередача. 1966. № 3.
2. Спассков В.П. и др. Программа для ЭВМ БЭСМ-6. Расчет нестационарных режимов энергетических установок с ВВЭР ДИНАМИКА. М: ЦНИИатоминформ. 1776/ОФАП. 1978.
3. Siche/heits analyse VVER-1000 (Contract N 85-120/8190). BRD. Siemens. UBKWU. U8114, 1988.

Статья поступила в редакцию
25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер.
Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 43—47.

эффективный коэффициент размножения ($K_{эфф}$), а искажения поля нейтронов, вызванные перемещением СУ и системы АР. Последняя будет перемещаться или из-за изменений в режиме охлаждения активной зоны, или если в результате движения СУ произойдет изменение реактивности аппарата. Обеспечение же реального времени, необходимого условия для тренажерных задач, приводит к требованию выполнения физического расчета с учетом локального воздействия органов управления за время порядка 0,1—0,2 с.

Такое несоответствие необходимого и действительного потребовало не усовершенствования старых методик и программ, а разработки новых подходов для решения задач моделирования физических процессов в реальном времени. Обычно [1] реального времени пытаются достигнуть за счет загробления модели и решения. При этом применяют крупную сетку (без должного обоснования) и при построении решения ограничиваются одной итерацией и т.д. Поскольку разница между приведенными выше временами велика, то и соответственно полученное таким образом решение может быть очень далеким от действительного.

В работе предлагается алгоритм, позволяющий за время менее 1 с (на ЭВМ типа АТ-386) построить с "удовлетворительной" точностью в однопроводном диффузионном приближении в трехмерной геометрии полномасштабные поля нейтронов.

Быстродействия удается достигнуть за счет разделения решения задачи на два этапа: подготовительного и основного. На первом этапе с учетом специфики рассматриваемого реактора (конкретной загрузки активной зоны, положения стержней СУ и т.д.) для каждого органа управления насчитываются функции влияния (ФВ), которые потом заносятся во внешнюю память ЭВМ, образуя там базу данных. В дальнейшем, на втором (основном) этапе, где требуется быстродействие, изменения поля нейтронов представляются в виде суперпозиции функций влияния, соответствующих перемещаемым СУ. В общем случае определение коэффициентов при этих ФВ сводится к решению системы алгебраических уравнений размерности NK , где N — число переместившихся СУ, а K — количество гармоник, используемых при описании аксиальной зависимости поля нейтронов при расчете ФВ.

Чтобы избежать работы с матрицами большой размерности при выводе некоторых соотношений, использовались методы теории возмущений. Полученное приближение позволяет существенно повысить быстродействие и, как показывают расчеты, приводит по сравнению с точным решением исходных уравнений к локальной ошибке в определении поля нейтронов порядка 5%.

Формулировка задачи. Рассмотрим стационарный режим работы реактора, уравнение состояния для которого (при однородных граничных условиях) запишем в виде

$$\hat{H}(r, z) N_0(r, z) = 0; \quad \int N_0(r, z) dv = 0, \quad (1)$$

где $\hat{H}(r, z)$ — оператор, описывающий в некотором приближении процессы, протекающие в реакторе; Q

— заданная величина, характеризующая мощность аппарата; $N_0(r, z)$ — начальное стационарное поле нейтронов.

Рассматриваемую задачу по аналогии с [2] сформулируем в следующем виде.

При заданных изменениях сечений поглощения тепловых нейтронов (характеризующих перемещения выбранных K стержней СУЗ) необходимо рассчитать поле нейтронов и величину перемещения стержня АР (поддерживающего критичность реактора), т.е. решить уравнения

$$\begin{aligned} \hat{H}(r, z) N(r, z) + \sum_{k=1}^K \rho_{j_k} F_{j_k}(r, z) N(r, z) + \\ + \rho_{AP} F_{AP}(r, z) N(r, z) = 0; \quad (2) \\ \int N(r, z) dv = Q, \end{aligned}$$

где $F_{j_k}(r, z)$ — функция, характеризующая пространственные изменения физических характеристик активной зоны при перемещении j_k стержня СУЗ; ρ_{j_k} — амплитуда изменения физических характеристик активной зоны.

В силу локальности расположения стержней управления, функцию $F_{j_k}(r, z)$, $F_{AP}(r, z)$ можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} F_{j_k}(r, z) = \delta(r - r_{j_k}) \frac{1}{M^2(r_{j_k}, z)} f_{j_k}(z); \\ F_{AP}(r, z) = \delta(r - r_{AP}) \frac{1}{M^2(r_{AP}, z)} f_{AP}(z), \quad (3) \end{aligned}$$

где $\delta(r - r_i)$ — дельта функция; $M^2(r, z)$ — квадрат длины миграции.

В случае, когда стержень j_k однороден по высоте, $f_{j_k}(z)$ характеризует месторасположение конца стержня и имеет вид

$$f_{j_k}(z) = \begin{cases} 1; & z_{j_k} < z < H; \\ 0; & 0 < z < z_{j_k}, \end{cases} \quad (4)$$

где z_{j_k} — координата расположения конца стержня.

В дальнейшем для простоты изложения будем рассматривать однопроводное диффузное приближение, т.е. оператор $\hat{H}(r, z)$ имеет вид

$$\hat{H}(r, z) = \Delta(r, z) + \alpha_0^2(r, z), \quad (5)$$

где $\alpha_0^2(r, z) = \left[\frac{1}{K_{эфф}} K_{\infty}(r, z) - 1 \right] \frac{1}{M^2(r, z)}$; $K_{эфф}$ — характеризует степень некритичности реактора (в данном случае $K_{эфф} = 1$); $K_{\infty}(r, z)$ — коэффициент размножения для бесконечной среды.

Метод решения. Первоначально рассмотрим решение задачи в линейном приближении, т.е. вместо (2) запишем

$$\begin{aligned} \hat{H}(r, z) N(r, z) + \sum_{k=1}^K \rho_{j_k} F_{j_k}(r, z) N_0(r, z) + \\ + \rho_{AP} F_{AP}(r, z) N_0(r, z) = 0; \quad (6) \\ \int N(r, z) dv = Q. \end{aligned}$$

Для рассматриваемого стационарного состояния и для каждого стержня СУЗ и АР введем в рассмотрение функции влияния $\Psi_j^m(r, z)$, которые рассчитываются из решения следующего уравнения (с теми же, что и в (1), граничными условиями):

$$\begin{aligned} \hat{H}(r, z) \Psi_j^m(r, z) = -\delta(r - r_j) \sin\left(\frac{\pi}{H} mz\right) + \nu_j^m \sin\left(\frac{\pi}{H} mz\right); \quad (7) \\ \int \Psi_j^m(r, z) dv = 0, \end{aligned}$$

где ν_j^m — некоторое собственное число.

Поскольку оператор \hat{H} — особый, значения ν_j^m рассчитываются из условия ортогональности правой части уравнения (7) к $N_0(r, z)$:

$$\nu_j^m = (\sin(\frac{\pi}{H} mz); N_0(r, z)) / (\sin(\frac{\pi}{H} mz); N_0(r, z)). \quad (8)$$

Решение уравнения (7) ищем в виде

$$\Psi_j^m(r, z) = \sum_{n=1}^{k \sin} \Psi_j^{m,n}(r) \sin\left(\frac{\pi}{H} nz\right). \quad (9)$$

После подстановки (9) в (7) и скалярного умножения полученного уравнения на $\sin(\frac{\pi}{H} kz)$ будем иметь

$$\begin{aligned} \Delta \Psi_j^{m,k}(r) + [(\alpha_0^2(r))^{(k,k)} - (\frac{\pi}{H} k)^2] \Psi_j^{m,k}(r) + \\ + \sum_n (\alpha_0^2(r))^{(n,k)} \Psi_j^{m,n}(r) = -\delta(r - r_j) \delta_{m,k} + \\ + \nu_j^m \delta_{1,k}; \quad k = 1, 2, \dots, k \sin, \quad (10) \end{aligned}$$

где $(\alpha_0^2(r))^{(n,k)} = (\alpha_0^2(r, z) \sin(\frac{\pi}{H} nz); \sin(\frac{\pi}{H} kz))$; $k \sin$ — количество используемых в разложении гармоник.

Введем в рассмотрение вектор столбцы $\vec{Y}_n^{(m)}$ и $\vec{e}^{(m)}$:

$$\begin{aligned} \vec{Y}_j^{(m)} = \text{col}(\Psi_j^{m,1}, \Psi_j^{m,2}, \Psi_j^{m,3}, \Psi_j^{m,4}, \dots); \\ \vec{e}^{(m)} = \text{col}(0, 0, \dots, 0, 1, 0, \dots). \end{aligned}$$

Перепишем уравнение (10) в следующем виде:

$$\hat{H}_R \vec{Y}_j^{(m)}(r) = -\delta(r - r_j) \vec{e}^{(m)} + \nu_j^m \vec{e}^{(1)}, \quad (11)$$

где оператор \hat{H}_R имеет матричный вид

$$\begin{aligned} \Delta + [(\alpha_0^2(r))^{(1,1)} - (\frac{\pi}{H})^2]; \\ (\alpha_0^2(r))^{(1,2)}; (\alpha_0^2(r))^{(1,3)}; (\alpha_0^2(r))^{(1,4)}; \dots \\ (\alpha_0^2(r))^{(2,1)}; \Delta + [(\alpha_0^2(r))^{(2,2)} - (\frac{\pi}{H})^2]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\alpha_0^2(r))^{(2,3)}; (\alpha_0^2(r))^{(2,4)}; \dots \\ \hat{H}_R = (\alpha_0^2(r))^{(3,1)}; (\alpha_0^2(r))^{(3,2)}; \\ \Delta + [(\alpha_0^2(r))^{(3,3)} - (\frac{\pi}{H})^2]; (\alpha_0^2(r))^{(3,4)}; \dots \quad (12) \\ \dots \\ \frac{(1, k \sin)}{\alpha_0^2(r)}; \frac{(2, k \sin)}{\alpha_0^2(r)}; \frac{(3, k \sin)}{\alpha_0^2(r)}; \dots \end{aligned}$$

Разложим в ряд Фурье и начальное стационарное поле:

$$N_0(r, z) = \sum_{m=1}^{k \sin} R_{0,m}(r) \sin\left(\frac{\pi}{H} mz\right). \quad (13)$$

После подстановки (13) в (1) и скалярного умножения полученного уравнения на $\sin(\frac{\pi}{H} nz)$ будем иметь

$$\hat{H}_R \vec{R}_0 = 0, \quad (14)$$

где $\vec{R}_0(r) = \text{col}(R_{0,1}, R_{0,2}, R_{0,3}, \dots)$.

Представим искомое решение $N(r, z)$ в виде

$$N(r, z) = A_0 N_0(r, z) + \sum_{m=1}^{k \sin} \varphi_m(r) \sin\left(\frac{\pi}{H} mz\right), \quad (15)$$

где A_0 — определяется из условия нормировки.

После подстановки (15) в (6) и скалярного умножения полученного уравнения на $\sin(\frac{\pi}{H} nz)$ будем иметь

$$\begin{aligned} \Delta \rho_n(r) + [(\alpha_0^2(r))^{(n,n)} - (\frac{\pi}{H} n)^2] \varphi_n(r) + \\ + \sum_{m=1}^K (\alpha_0^2(r))^{(m,n)} \varphi_m(r) + \sum_{k=1}^K \rho_{j_k} \delta(r - r_{j_k}) a_{j_k}^n + \\ + \rho_{AP} \delta(r - r_{AP}) a_{AP}^n = 0; \quad n = 1, 2, \dots, k \sin, \quad (16) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} a_i^n = \left(\frac{1}{M^2} (r_i, z) f_i(z) N_0(r_i, z); \sin\left(\frac{\pi}{H} nz\right)\right); \\ i = j_k; \quad i = AP. \end{aligned}$$

В дальнейшем для простоты записи стержень АР не будем выделять и номер j_{k+1} будет соответствовать АР.

Введем в рассмотрение вектор столбцы \vec{u}_n и \vec{a}_{j_k} :

$$\begin{aligned} \vec{u} = \text{col}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \dots); \quad (17) \\ \vec{a}_{j_k} = \text{col}(a_{j_k}^1, a_{j_k}^2, a_{j_k}^3, \dots). \end{aligned}$$

С учетом (17) вместо уравнения (16) получим

$$\hat{H}_R \vec{u} + \sum_{k=1}^{K+1} \rho_{j_k} \delta(r - r_{j_k}) \vec{a}_{j_k} = 0. \quad (18)$$

Решение уравнения (18) запишем в виде

$$\vec{u} + \sum_{k=1}^{K+1} \rho_{j_k} \sum_{n=1}^{k \sin} a_{j_k}^n \vec{Y}_{j_k}^{(n)}. \quad (19)$$

После подстановки (19) в (18) с учетом (11) будем иметь

$$\sum_{k=1}^{K+1} \rho_{j_k} \sum_{n=1}^{k \sin} a_{j_k}^n \{-\delta(r - r_{j_k}) \vec{e}^{(n)} + v_{j_k}^n \vec{e}^{(1)}\} + \sum_{k=1}^{K+1} \rho_{j_k} \delta(r - r_{j_k}) \vec{a}_{j_k} = 0.$$

После преобразования полученного выражения с учетом того, что

$$\vec{a}_{j_k} = \sum_{n=1}^{k \sin} a_{j_k}^n \vec{e}^{(n)}, \quad (20)$$

получим, что решение (19) тождественно обращает в нуль уравнение (18) при выполнении условия

$$\sum_{k=1}^{K+1} \rho_{j_k} \sum_{n=1}^{k \sin} a_{j_k}^n v_{j_k}^n = 0. \quad (21)$$

Подставив (8) в (21) и выделяя AP, получим с учетом выражения (13) условие критичности

$$\sum_{k=1}^K \rho_{j_k} \sum_{n=1}^{k \sin} a_{j_k}^n R_{0,n}(r_{j_k}) + \rho_{AP} \sum_{n=1}^{k \sin} a_{AP}^n R_{0,n}(r_{AP}) = 0. \quad (22)$$

Из уравнения (22) определим положение стержня AP, т.е. найдем либо ρ_{AP} , либо координату положения конца стержня AP, т.е. z_{AP} .

Таким образом, создав заранее базу данных из функций влияния, в дальнейшем с помощью выражений (15), (19) и (22) легко получить в линейном приближении решение исходного уравнения при любых наборах номеров перемещаемых стержней управления.

При расчете функций влияния возможны дальнейшие упрощения, например за счет пренебрежения перекрестными членами. В этом случае определение функций влияния сводится к решению ряда двумерных задач.

Рассмотрим теперь решение непосредственно уравнения (2). Как и ранее будем считать, что функции влияния известны и удовлетворяют уравнению (11).

Выполнив такие же, как и выше преобразования, получим уравнение (18), в котором компоненты вектора \vec{a}_{j_k} зависят от искомого поля $N(r, z)$ и имеют вид

$$a_i^n = \left(\frac{1}{M^2}(r_i, z) f_i(z) N(r_i, z); \sin\left(\frac{\pi}{H} nz\right) \right); \quad (23)$$

$$i = j_k; i = AP.$$

Решение уравнения (18) аналогично предыдущему запишем в виде суммы (19), после чего получим условие

критичности (20), которое с учетом выражения (23) также зависит от поля $N(r, z)$.

Запишем согласно (15), (19) выражения для определения поля нейтронов в точках с координатами r_i , где $i = j_1, j_2, j_3, j_4, \dots, j_K, AP$:

$$N(r_i, z) = A_0 N_0(r_i, z) + \sum_{m=1}^{k \sin} \sin\left(\frac{\pi}{H} mz\right) \left\{ \sum_{k=1}^{K+1} \rho_{j_k} \sum_{n=1}^{k \sin} a_{j_k}^n (\vec{Y}_{j_k}^{(n)}(r_i); \vec{e}^{(m)}) \right\}.$$

После умножения (24) на функцию $G_i^m(z)$, равную

$$G_i^m(z) = \frac{1}{M^2}(r_i, z) f_i(z) \sin\left(\frac{\pi}{H} mz\right),$$

и интегрирования по z с учетом (23) получим систему алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов a_i^m , которую можно записать в виде

$$a_i^m [1 - \rho_i \overline{\Psi_i^m(r_i)}^m] - \rho_i \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^{k \sin} a_i^n \overline{\Psi_i^n(r_i)}^m - \sum_{\substack{k=1 \\ j_k \neq i}}^{K+1} \rho_{j_k} \sum_{n=1}^{k \sin} a_{j_k}^n \overline{\Psi_j^n(r_i)}^m = a_{0,i}^m,$$

где

$$\overline{\Psi_i^m(r_i)}^n = (\Psi_i^m(r_i, z); G_i^n(z)); i = j_1, j_2, j_3, j_4, \dots, j_K, AP;$$

$$\text{условие критичности } \sum_{k=1}^{K+1} \rho_{j_k} \sum_{n=1}^{k \sin} a_{j_k}^n v_{j_k}^n = 0.$$

Для определения неизвестных a_i^m и ρ_{AP} необходимо решить систему уравнений размерности $k \sin(K+1)$, что может потребовать дополнительного времени. Поэтому был рассмотрен вопрос построения приближенного решения. Последнее было достигнуто за счет отбрасывания в первом приближении всех недиагональных членов. В этом случае будем иметь следующее выражение для расчета коэффициентов:

$$a_i^m = a_{0,i}^m / [1 - \rho_i \overline{\Psi_i^m(r_i)}^m].$$

Соответственно упрощается и условие критичности.

Отметим, что при равенстве знаменателя единице получим выражение, совпадающее с линейным приближением. С помощью знаменателя удастся учесть в некотором приближении нелинейность задачи, связанную с тем, что ввод реактивности сопровождается искажениями поля, которые в свою очередь приводят к изменению весов стержней.*

Предложенный алгоритм построения приближенного решения позволяет существенно повысить быстродействие и, как показывают начальные тестовые расчеты, приводит по сравнению с точным решением исходных уравнений к локальной ошибке в определении поля порядка 5%.

* При необходимости, несколько усложнив выражения, можно приближенно учесть также и эффект интерференции между стержнями и т.д.

В заключение отметим, что обобщение предложенного алгоритма для расчета полей в двугрупповом приближении несущественно будет сказываться на времени решения задачи. Основное увеличение объема вычислений в этом случае переносится на этап подготовки исходных данных, т.е. расчет функций влияния в двугрупповом приближении.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Коротин А.В. Метод моделирования кинетики ядерного реактора для тренажеров операторов АЭС: Автореф. дис. МИФИ. М, 1988.

2. Афанасьев А.М. Быстродействующий алгоритм расчета поля нейтронов в реакторе для работы в режиме диалога с ЭВМ. Атомная энергия. Т. 61. Вып. 1. С. 31.

Статья поступила в редакцию
25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер.
Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 47—51.

УДК 621.039.51

МЕТОД ПОКАНАЛЬНОГО РАСЧЕТА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА ОСНОВЕ КРУПНОЙ СЕТКИ

В.Н. Конев, Б.З. Торлин

Описывается подход к созданию крупно-сеточной модели ядерного реактора, позволяющей определять дву- или трехмерные поканальные распределения энерговыделения в гетерогенной активной зоне канального реактора с большим числом каналов, размещенных в правильной гексагональной решетке.

A METHOD OF CHANNEL-BY-CHANNEL CALCULATION OF A NUCLEAR REACTOR BASED ON COARSE GRID. V.N. KONEV, B.Z. TORLIN. An approach to developing a coarse-grid model of a nuclear reactor allowing to recover two- or three-dimensional channel-by-channel energy release distributions within a heterogeneous core of a pressure tube reactor with a large number of channels located in a regular hexagonal grid.

Интенсивные исследования по развитию методов вычисления дву- и трехмерных распределений энерговыделения в активной зоне ядерных реакторов привели к созданию широкого класса нодальных методов и методов расчета характеристик реакторов на грубой сетке, обладающих приемлемой точностью и высокой вычислительной эффективностью [1].

Однако, как правило, развитие этих методов, связанное с повышением точности описания распределения энерговыделения внутри ячейки крупной сетки или ноды, осуществлялось для конкретных типов реакторов, характеризующихся определенной геометрией, структурой загрузки активной зоны, конструкцией ТВС и т.п. [2—4].

В основе предлагаемой в статье модели лежит двухэтапная схема расчета распределения энерговыделения, включающая следующие этапы:

— одnogрупповой крупно-сеточный диффузионный расчет распределения потока нейтронов, среднего по макроячейкам, на которые условно разбита активная зона [5];

— восстановление поканального распределения энерговыделения внутри макроячейки на основе полученных на первом этапе значений нейтронного потока соседних макроячеек [6].

При разработке методики восстановления использовались идеи, связанные с построением матриц коэффициентов связи на основе поверхностных токов, используемых, в частности, в методах гомогенизации [7, 8] и нодального разложения [9, 10].

Кроме изучения стационарных и переходных процессов модель такого типа может быть использована в качестве составной части специального математического обеспечения Системы централизованного контроля, предназначенного для управляющих компьютеров, имеющих ограниченную память и быстродействие, а также в качестве базовой модели имитатора нейтронно-физических характеристик ядерного реактора для тренажера ЯЭУ.

Методика подготовки интегральных характеристик технологических и поглотительных каналов. Рассмотрим активную зону гетерогенного ядерного реактора с гексагональной решеткой, которая условно может быть разбита на центральные и периферийные

макроячейки. Схемы таких макроячеек представлены на рис. 1.

Уравнение баланса для k -й центральной макроячейки, состоящей из регулирующего стержня (РС), 12 технологических каналов (ТК)* и 6 пограничных каналов (ПК)**), расположенных на гранях макроячейки, в предположении, что к данной макроячейке относится только половина ПК, имеет следующий вид:

$$\sum_{i=1}^6 (\Phi_i^k - \Phi_0^k) + \frac{24a^2}{D} [12(\eta - 1) \Sigma_a^T - \sum_{i=1}^6 0,5 \Sigma_a^i - \Sigma_a^{PC}(h)] \Phi_0^k = 0 \quad (1)$$

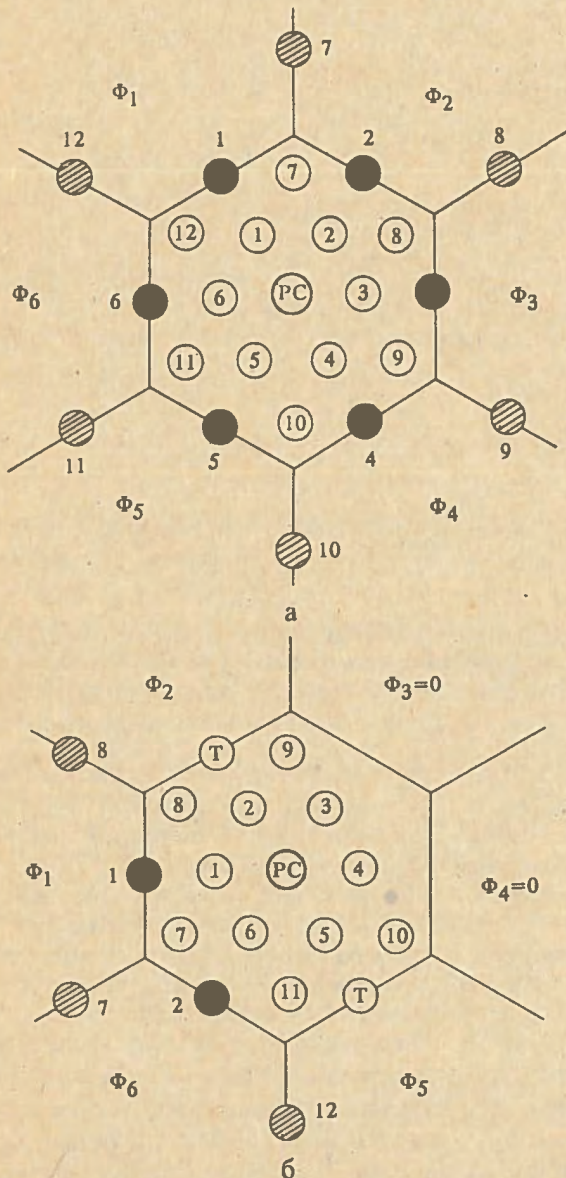


Рис. 1. Схемы макроячеек центральной (а) и периферийной (б) областей активной зоны: I — технологические каналы внутри макроячейки; Т — технологические каналы на границе макроячейки; Р — стержень СУЗ; ● — пограничные каналы данной макроячейки; ⊙ — пограничные каналы соседних макроячеек; $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_6$ — нейтронный поток в соседних макроячейках

*) Для простоты изложения материала рассмотрим ТК с одинаковым выгоранием.

**) Будем полагать ПК неразмножающимися.

для периферийной k -й макроячейки, состоящей из РС, 11 ТК и 4 ПК:

$$\sum_{i=1}^4 (\Phi_i^k - \Phi_0^k) + (\lambda - 2) \Phi_0^k + \frac{21a^2}{D} [12(\eta - 1) \Sigma_a^T - \sum_{i=1}^2 0,5 \Sigma_a^i - \Sigma_a^{PC}(h)] \Phi_0^k = 0, \quad (2)$$

где a — шаг решетки; D — коэффициент диффузии; η — число вторичных нейтронов на захват в ТК; Σ_a^T, Σ_a^i и $\Sigma_a^{PC}(h)$ — усредненные макроскопические сечения захвата в ТК, ПК и РС; Φ_0^k — макропоток в k -й макроячейке; Φ_i^k — макропоток в i -й соседней макроячейке около k -й макроячейки; λ — условие на границе периферийной макроячейки.

Здесь $\Sigma_a^{PC}(h) = \sum_{l=0}^L b_l (\frac{h}{H} - 0,5)^l$, где h — глубина погружения РС; H — высота активной зоны; b_l — коэффициенты полиномиального представления; L — степень полинома.

Введем следующие обозначения:

$$\alpha_T = (24a^2/D) 12(\eta - 1) \Sigma_a^T;$$

$\beta_i = (24a^2/D) 0,5 \Sigma_a^i, i = 1, 2, \dots, N$, если имеется N различных ПК в картограмме; $\gamma_l = (24a^2/D) b_l$, где α_T, β_i и γ_l — интегральные характеристики каналов, описывающие соответственно процессы поглощения и размножения нейтронов в ТК, ПК и РС.

Уравнения (1) и (2) с учетом введенных обозначений имеют следующий вид:

$$\sum_{i=1}^6 (\Phi_i^k - \Phi_0^k) + [\alpha_T - \sum_{i=1}^6 \beta_i^k - \sum_{l=0}^L \gamma_l (\frac{h}{H} - 0,5)^l] \Phi_0^k = 0;$$

$$\sum_{i=1}^4 (\Phi_i^k - \Phi_0^k) + (\lambda - 2) \Phi_0^k + \frac{7}{8} [\alpha_T - \sum_{i=1}^2 \beta_i^k - \sum_{l=0}^L \gamma_l (\frac{h}{H} - 0,5)^l] \Phi_0^k = 0.$$

Здесь и далее, несмотря на видимое однообразие верхних индексов, тем не менее, k — индекс; l — степень; β_i^k — одинаковые, если одинаковы ПК.

Оценку значений $\alpha_T, \beta_i, \gamma_l$ и λ будем проводить на основе минимизации суммарной квадратичной невязки по всем рассматриваемым макроячейкам активной зоны. Для улучшения статистики необходимо использовать данные по нескольким реализациям. В качестве базовых величин Φ_i^k можно использовать значения данных, полученных с помощью точных программ расчета нейтронно-физических характеристик реактора (например, TREC6 [11]) или на основе результатов

измерений распределения нейтронного поля на действующем реакторе.

Таким образом, пусть

$$\sum_{i=1}^6 (\Phi_i^k - \Phi_0^k) + \left[\alpha_T - \sum_{i=1}^6 \beta_i^k - \sum_{l=0}^L \gamma_l \left(\frac{h}{H} - 0,5 \right)^l \right] \Phi_0^k = \varepsilon_k$$

для центральных полячек, а

$$\sum_{i=1}^6 (\Phi_i^k - \Phi_0^k) + (\lambda - 2) \Phi_0^k + \frac{7}{8} \left[\alpha_T - \sum_{i=1}^6 \beta_i^k - \sum_{l=0}^L \gamma_l \left(\frac{h}{H} - 0,5 \right)^l \right] \Phi_0^k = \varepsilon_k$$

для периферийных.

После минимизации суммарной квадратичной невязки $\varepsilon^2 = \sum \varepsilon_k^2$ по $\alpha_T, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N, \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_L$ и λ определение вектора неизвестных $\vec{X} = \text{col}(\alpha_T, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N, \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_L, \lambda)$ сводится к решению следующей системы уравнений:

$$\widehat{K} \vec{X} = \vec{F}$$

Здесь \vec{F} и \vec{X} — векторы размерностью $M = 2 + N + L$; $\widehat{K} = \widehat{N} + \frac{49}{64} L$; $\widehat{K}, \widehat{N}, \widehat{L}$ — матрицы размерностью $M \times M$ подробно описаны в работе [5].

Определение распределения потока нейтронов на крупной сетке. В двумерном (X-Y) одгрупповом диффузионном приближении $\Phi_0(r)$ распределение потока нейтронов определяется из уравнения

$$\Delta \Phi_0(r) + B_0^2(r) \Phi_0(r) = 0 \quad (3)$$

с однородными граничными условиями.

Здесь

$$B_0^2(r) = \frac{K_0(r) - 1}{M_0^2(r)} = \frac{(\eta - 1) \Sigma_T - \Sigma_n}{D} = \frac{(\eta - 1) \frac{\Sigma_T}{\Sigma_n} - 1}{D / \Sigma_n} = \frac{Q(r) - 1}{M_n^2(r)}$$

точник и площадь миграции нейтронов макроячейки реактора, обусловленная поглощением в ПК, где значения $Q(r)$ и $M_n^2(r)$ для k -й макроячейки определяются с помощью следующих соотношений:

для центральных макроячек

$$M_n^2(r) = 24a^2 / \left[\sum_{l=1}^6 \beta_l + \sum_{l=1}^L \gamma_l \left(\frac{h}{H} - 0,5 \right)^l \right];$$

$$Q(r) = \alpha_T / \left[\sum_{l=1}^6 \beta_l + \sum_{l=1}^L \gamma_l \left(\frac{h}{H} - 0,5 \right)^l \right];$$

для периферийных макроячек

$$M_n^2(r) = 21a^2 / \left[\sum_{l=1}^6 \beta_l + \sum_{l=1}^L \gamma_l \left(\frac{h}{H} - 0,5 \right)^l \right];$$

$$Q(r) = \frac{7}{8} \alpha_T / \left[\sum_{l=1}^6 \beta_l + \sum_{l=1}^L \gamma_l \left(\frac{h}{H} - 0,5 \right)^l \right].$$

После конечно-разностной аппроксимации уравнения (3), в приближении один узел на макроячейку реактора, данное уравнение может быть решено методом итерации источника.

Методика определения коэффициентов связи для восстановления поканального распределения потока нейтронов внутри макроячейки. Энерговыведение в ТК центральной макроячейки может быть описано в виде суперпозиции влияния макрополя макроячейки и шести ее соседей, а также влияний РС и ПК макроячейки и шести ближайших к ней (см. рис. 1, а). Для целей определения коэффициентов связи удобно пользоваться соотношением

$$\vec{f}_c^K = \frac{\Phi_0^K}{12} + \widehat{F}_c^K \vec{w}_c + \widehat{A}_c^K \vec{p}_c + \widehat{G}_c^K \vec{g}_c + A_0^K \delta \vec{\Delta}_c, \quad (4)$$

где $\vec{f}_c^K = \text{col}\{\phi_1^k, \phi_2^k, \dots, \phi_{12}^k\}$ — вектор энерговыведений с компонентами; ϕ_i^k — энерговыведение в i -м ТК и k -й макроячейки; $\vec{w}_c = \text{col}\{w_1, w_2, \dots, w_7\}$ — вектор коэффициентов влияния на энерговыведение в i -м ТК потока нейтронов данной и соседних макроячек; $\vec{p}_c = \text{col}\{p_1, p_2, \dots, p_7\}$ — вектор коэффициентов влияния на энерговыведение в i -м ТК поглощения в ПК, расположенных на границах данной макроячейки; $\vec{g}_c = \text{col}\{g_1, g_2, \dots, g_7\}$ — вектор коэффициентов влияния на энерговыведение в i -м ТК поглощения в ближайших к данной макроячейке ПК соседних макроячек; A_0^K — поглощение в РС; δ — коэффициент влияния на энерговыведение в i -м ТК поглощения в РС; $\vec{\Delta}_c = \{-1, -1, -1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1\}$; $\widehat{F}_c^K, \widehat{A}_c^K, \widehat{G}_c^K$ — матрицы размерностью 12×7 с учетом симметрии расположения каналов в макроячейке, данные матрицы имеют следующий вид:

$$\hat{F}_c^K = \begin{pmatrix} f_1^K, f_2^K + f_6^K, f_3^K + f_5^K, f_4^K, & 0; & 0; & 0; \\ f_2^K, f_3^K + f_1^K, f_4^K + f_6^K, f_5^K, & 0; & 0; & 0; \\ f_3^K, f_4^K + f_2^K, f_5^K + f_1^K, f_6^K, & 0; & 0; & 0; \\ f_4^K, f_5^K + f_1^K, f_6^K + f_2^K, f_1^K, & 0; & 0; & 0; \\ f_5^K, f_6^K + f_2^K, f_1^K + f_3^K, f_2^K, & 0; & 0; & 0; \\ f_6^K, f_1^K + f_3^K, f_2^K + f_4^K, f_3^K, & 0; & 0; & 0; \\ 0; & 0; & 0; & 0; & f_1^K + f_2^K, f_6^K + f_3^K, f_5^K + f_4^K, \\ 0; & 0; & 0; & 0; & f_2^K + f_3^K, f_1^K + f_4^K, f_6^K + f_5^K, \\ 0; & 0; & 0; & 0; & f_3^K + f_4^K, f_2^K + f_5^K, f_1^K + f_6^K, \\ 0; & 0; & 0; & 0; & f_4^K + f_5^K, f_3^K + f_6^K, f_2^K + f_1^K, \\ 0; & 0; & 0; & 0; & f_5^K + f_6^K, f_4^K + f_1^K, f_3^K + f_2^K, \\ 0; & 0; & 0; & 0; & f_6^K + f_1^K, f_5^K + f_2^K, f_4^K + f_3^K, \end{pmatrix}$$

$$\hat{A}_c^K = \begin{pmatrix} A_1^K, A_2^K + A_6^K, A_3^K + A_5^K, A_4^K, & 0; & 0; & 0; \\ A_2^K, A_3^K + A_1^K, A_4^K + A_6^K, A_5^K, & 0; & 0; & 0; \\ A_3^K, A_4^K + A_2^K, A_5^K + A_1^K, A_6^K, & 0; & 0; & 0; \\ A_4^K, A_5^K + A_3^K, A_6^K + A_2^K, A_1^K, & 0; & 0; & 0; \\ A_5^K, A_6^K + A_4^K, A_1^K + A_3^K, A_2^K, & 0; & 0; & 0; \\ A_6^K, A_1^K + A_5^K, A_2^K + A_4^K, A_3^K, & 0; & 0; & 0; \\ 0; & 0; & 0; & 0; & A_1^K + A_2^K, A_6^K + A_3^K, A_5^K + A_4^K, \\ 0; & 0; & 0; & 0; & A_2^K + A_3^K, A_1^K + A_4^K, A_6^K + A_5^K, \\ 0; & 0; & 0; & 0; & A_3^K + A_4^K, A_2^K + A_5^K, A_1^K + A_6^K, \\ 0; & 0; & 0; & 0; & A_4^K + A_5^K, A_3^K + A_6^K, A_2^K + A_1^K, \\ 0; & 0; & 0; & 0; & A_5^K + A_6^K, A_4^K + A_1^K, A_3^K + A_2^K, \\ 0; & 0; & 0; & 0; & A_6^K + A_1^K, A_5^K + A_2^K, A_4^K + A_3^K, \end{pmatrix}$$

$$\hat{G}_c^K = \begin{pmatrix} A_7^K + A_{12}^K & A_8^K + A_{11}^K & A_9^K + A_{10}^K & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_8^K + A_7^K & A_9^K + A_{12}^K & A_{10}^K + A_{11}^K & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_9^K + A_8^K & A_{10}^K + A_7^K & A_{11}^K + A_{12}^K & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{10}^K + A_9^K & A_{11}^K + A_8^K & A_{12}^K + A_7^K & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{11}^K + A_{10}^K & A_{12}^K + A_9^K & A_7^K + A_8^K & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{12}^K + A_{11}^K & A_7^K + A_{10}^K & A_8^K + A_9^K & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_7^K & A_{12}^K + A_8^K & A_{11}^K + A_9^K & A_{10}^K \\ 0 & 0 & 0 & A_8^K & A_7^K + A_9^K & A_{12}^K + A_{10}^K & A_{11}^K \\ 0 & 0 & 0 & A_9^K & A_8^K + A_{10}^K & A_7^K + A_{11}^K & A_{12}^K \\ 0 & 0 & 0 & A_{10}^K & A_9^K + A_{11}^K & A_8^K + A_{12}^K & A_7^K \\ 0 & 0 & 0 & A_{11}^K & A_{10}^K + A_{12}^K & A_9^K + A_7^K & A_8^K \\ 0 & 0 & 0 & A_{12}^K & A_{11}^K + A_7^K & A_{10}^K + A_8^K & A_9^K \end{pmatrix}$$

Здесь $f_I^K = \Phi_I^K - \Phi_0^K$; A_I^K — поглощение в i -м ПК (см. рис. 1,а).

Для периферийной k -й макроячейки (см. рис. 1,б) аналогичное уравнение связи в предположении, что поток нейтронов на шаге макроячейки от края активной зоны равен нулю (т.е. соответственно со схемой на рис. 1,б $\Phi_3 = 0$ и $\Phi_4 = 0$), имеет следующий вид:

$$\vec{f}_p^K = \frac{\phi_0^K}{12} + \hat{F}_p^K \vec{w}_p + \hat{A}_p^K \vec{p}_p + \hat{G}_p^K \vec{g}_p + A_0^K \delta \vec{\Delta}_p, \quad (5)$$

где $\vec{f}_p^K = \text{col}\{\phi_1^k, \phi_2^k, \dots, \phi_{10}^k\}$; $\vec{w}_p, \vec{p}_p, \vec{g}_p$ — векторы коэффициентов связи, аналогичные $\vec{w}_c, \vec{p}_c, \vec{g}_c$; $\vec{\Delta}_p = \{-1, -1, -1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1, 1\}$; $\hat{F}_p^K, \hat{A}_p^K, \hat{G}_p^K$ — матрицы размерностью 11×7 . Структура данных матриц подробно описана в работе [6].

Процедура определения коэффициентов связи w, p, q и δ основывается на решении уравнений (4) и (5) для всех макроячеек активной зоны. Для улучшения статистики необходимо использовать информацию по нескольким реализациям распределения нейтронного потока, полученным для активных зон, отличающихся картограммами загрузки (наличием и расположением ПК определенных типов в активной зоне) и глубинами погружения РС в макроячейках.

Определение коэффициентов связи можно проводить на базе поканальных распределений энерговыделения, полученных, например, как и на первом этапе при определении интегральных характеристик ячеек реактора по программе TREC6 или на основе результатов измерений распределений нейтронного поля на действующем реакторе и результатов оценки поглощения в ПК на базе этих измерений.

Введем следующие обозначения:

$$\vec{S}_C = \text{col}\{\vec{f}_C^1, \vec{f}_C^2, \dots, \vec{f}_C^{NPP}\};$$

$$\hat{V}_C = \begin{pmatrix} \frac{\Phi_0^1}{12} \hat{E}; & \hat{F}_C^1; & \hat{A}_C^1; & \hat{G}_C^1; & \hat{A}_0^1; & \vec{\Delta}_C; \\ \frac{\Phi_0^2}{12} \hat{E}; & \hat{F}_C^2; & \hat{A}_C^2; & \hat{G}_C^2; & \hat{A}_0^2; & \vec{\Delta}_C; \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\Phi_0^{NPP}}{12} \hat{E}; & \hat{F}_C^{NPP}; & \hat{A}_C^{NPP}; & \hat{G}_C^{NPP}; & \hat{A}_0^{NPP}; & \vec{\Delta}_C; \end{pmatrix}$$

$$\vec{R}_C = \text{col}\{\vec{w}_C, \vec{p}_C, \vec{g}_C, \delta\}.$$

Тогда система уравнений для определения коэффициентов связи в матричном виде имеет вид: $\hat{V}_C \vec{R}_C = \vec{S}_C$. С учетом NR реализаций

$$\hat{H}_C \vec{R}_C = \vec{T}_C, \quad (6)$$

где

$$\hat{H}_C = \text{col}\{\hat{V}_C^1, \hat{V}_C^2, \dots, \hat{V}_C^{NR}\};$$

$$\vec{T}_C = \text{col}\{\vec{S}_C^1, \vec{S}_C^2, \dots, \vec{S}_C^{NR}\}.$$

Решая систему уравнений (6) методом наименьших квадратов, получим $\vec{R}_C = (\hat{H}_C^T \hat{H}_C)^{-1} \hat{H}_C^T \vec{T}_C$. Аналогичная процедура используется и для определения коэффициентов связи для периферийных макроячеек.

Методика восстановления поканального распределения потока нейтронов внутри макроячейки на основе данных крупно-сеточного расчета. Рассмотрим процедуру восстановления поканального распределения нейтронного потока внутри макроячейки. Пусть

$$A_I^K = \begin{cases} 0,5 x_I^K (\Phi_I^K + \Phi_0^K) & i = 1, 2, \dots, 6; \\ 0,5 x_I^K (\Phi_{I-6}^K + \Phi_{I-5}^K) & i = 7, 8, \dots, 11; \\ 0,5 x_I^K (\Phi_I^K + \Phi_6^K) & i = 12, \end{cases}$$

где x_I^K — коэффициент связи поглощения в ПК с потоком нейтронов в макроячейках, на границах кото-

рых расположен данный ПК; $A_0^K = x_{PC}^K \Phi_0^K$; x_{PC}^K — коэффициент связи поглощения в РС с потоком нейтронов в k -й макроячейке.

$$x_{PC}^K(h) = \frac{D}{24a^2} \sum_{l=0}^L \gamma_l \left(\frac{h}{H} - 0,5\right)^l; \quad x_I^K = \frac{D\beta_I^K}{24a^2}.$$

Тогда вектор энерговыделений в ТК k -й центральной макроячейки \vec{f}_C^K определяется следующим образом:

$$\vec{f}_C^K = \hat{Y}_C^K \vec{\Phi}_C^K,$$

для периферийных макроячеек:

$$\vec{f}_P^K = \hat{Y}_P^K \vec{\Phi}_P^K,$$

где

$$\vec{\Phi}_C^K = \text{col} \{ \Phi_0^K, \Phi_1^K, \Phi_2^K, \Phi_3^K, \Phi_4^K, \Phi_5^K, \Phi_6^K \};$$

$$\vec{\Phi}_P^K = \text{col} \{ \Phi_0^K, \Phi_1^K, \Phi_2^K, \Phi_5^K, \Phi_6^K \}.$$

Здесь \hat{Y}_C^K и \hat{Y}_P^K — матрицы коэффициентов связи размерностью 12×7 и 11×5 соответственно, полученные на основе преобразований уравнений (4) и (5) с учетом определенных векторов коэффициентов связи w, p, q, δ и x . Структура и алгоритм формирования элементов данных матриц подробно представлены в работе [6].

Результаты расчета. Разработанная выше методика реализована в следующих программах:

PODREC — определение коэффициентов связи для процедур восстановления энерговыделения в ТК;

CORINT — оценка интегральных характеристик ТК и ПК активной зоны для определения на их основе одногрупповых диффузионных параметров макроячеек реактора;

CORMES — двумерный одногрупповой диффузионный расчет распределения энерговыделения на крупной сетке с последующим восстановлением энерговыделения ТК.

Ниже представлены результаты использования данного комплекса программ для расчета поканально-го распределения потока нейтронов в реакторе на тепловых нейтронах с правильной гексагональной решеткой, активная зона которого условно может быть разбита на 61 полячейку. Из них 37 центральных (см. рис. 1,а) и 24 периферийных (см. рис. 1,б).

При подготовке коэффициентов связи и интегральных характеристик каналов использовались результаты серии расчетов по программе *TREC6*, проведенных в трехмерном трехгрупповом приближении. Для описания высотного распределения энерговыделения использовались 7 гармоник.

Результаты расчетов по программе *CORMES* сравнены с данными аналогичных расчетов по программе *TREC6*.

На рис. 2 приводится картограмма распределения потока нейтронов по макроячейкам активной зоны, полученного по программам *CORMES* и *TREC6*, а также относительные погрешности расчета потока нейтронов в макроячейках по программе *CORMES*.

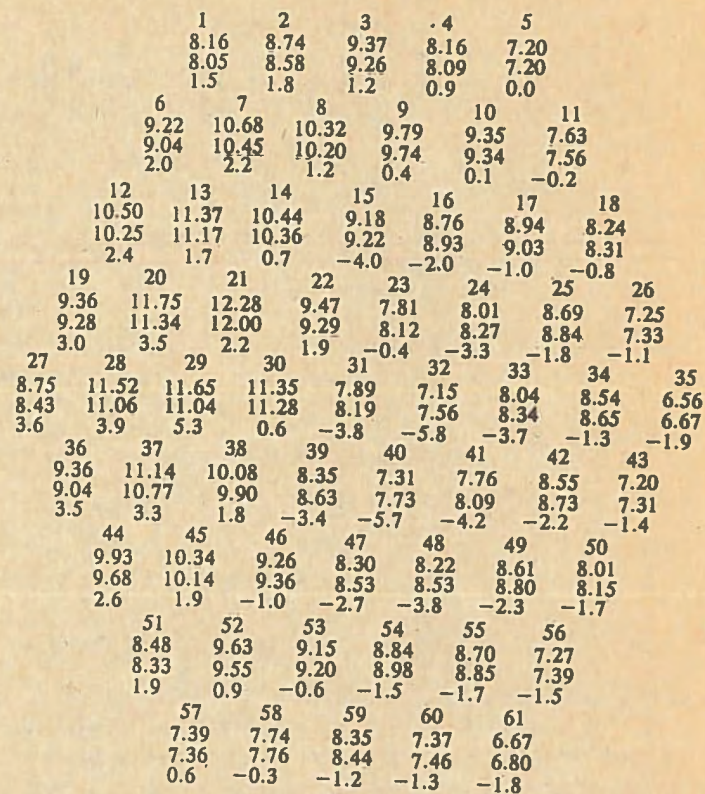


Рис. 2. Картограмма распределения потока нейтронов по макроячейкам активной зоны ($K_r = 1,58$; максимальная погрешность — 5,8%, средняя квадратичная — 2,5%):

x — порядковый номер макроячейки

xx. xx — *TREC6*

xx. xx — *CORMES*

x.x — относительная погрешность в процентах

Данное распределение потока нейтронов соответствует варианту загрузки активной зоны, когда на границе макроячеек 21 и 30 извлечен ПК (до извлечения $K_r = 1,19$).

В таблице для этого же варианта приводятся результаты вычисления значений нейтронного потока в каналах, расположенных внутри макроячейки, по программам *TREC6* и *CORMES*. Данные приводятся для центральной и периферийной макроячеек с максимальными погрешностями расчета. Там же представлены относительные погрешности расчета по программе *CORMES* и значения нейтронного потока и погрешности восстановления в случае, когда в качестве среднего потока нейтронов в макроячейках брались их точные значения, полученные по программе *TREC6* (*TR-COR*).

Время расчета варианта на ЭВМ ЕС-1061 по программе *TREC6* — 20 с, по программе *CORMES* — 1 с. Объемы оперативной памяти, занимаемые программами, составляют 500 и 50 кбайт соответственно.

Результаты расчета значений энерговыделения в ТК макроячеек № 32 и № 44 по программам *TREC6* и *CORMES*

№ ТК	<i>TREC6</i>	<i>TR-COP</i>	Е%	<i>CORMES</i>	Е%
Макроячейка № 32					
1	0,606	0,606	0,0	0,641	- 5,8
2	0,610	0,607	0,5	0,641	- 5,1
3	0,607	0,604	0,7	0,638	- 5,0
4	0,602	0,599	0,5	0,636	- 5,6
5	0,593	0,594	- 0,1	0,632	- 6,5
6	0,596	0,599	- 0,5	0,635	- 6,6
7	0,598	0,597	0,1	0,629	- 5,2
8	0,601	0,596	0,8	0,628	- 4,5
9	0,595	0,590	0,8	0,624	- 4,9
10	0,579	0,577	0,3	0,615	- 6,2
11	0,573	0,578	- 1,0	0,615	- 7,4
12	0,587	0,592	- 0,8	0,625	- 6,5
Макроячейка № 44					
1	0,887	0,887	0,0	0,863	2,8
2	0,915	0,914	0,2	0,886	3,2
3	0,903	0,902	0,1	0,877	2,8
4	0,865	0,865	0,0	0,845	2,3
5	0,766	0,767	- 0,1	0,751	2,0
6	0,775	0,775	0,0	0,758	2,2
7	0,880	0,878	0,2	0,849	3,5
8	0,859	0,858	0,2	0,830	3,5
9	0,842	0,841	0,1	0,820	2,6
10	0,702	0,703	- 0,1	0,690	1,8
11	0,728	0,729	- 0,1	0,710	2,5

Список литературы

1. Lawrence R.D. Progress in nodal methods for the solution of the neutron diffusion and transport equations // *Progress Nuclear Energy*. 1986. Vol. 17. № 3. P. 271—301.
2. Smith K.S., Ver Planck D.H., Edenius H. QPANDA: an advanced nodal method for LWR analyses // *Trans. Amer. Nucl. Soc.* 1995. Vol. 50. P.532—533.

3. Серегин А.С. О повышении точности решения малогрупповой задачи диффузии на крупной сетке в трехмерной гексагональной геометрии // *ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов*. 1985. Вып. 5. С. 46—53.
4. Chung Dae Y., Spier Edward M., Johnson Bruce L. Application of the Westinghouse advanced nodal code in advanced core monitoring // *Trans. Amer. Nucl. Soc.* 1988. Vol. 56. P. 557— 558.
5. Конев В.Н., Торлин Б.З. Метод поканального расчета ядерного реактора на основе крупной сетки. Алгоритмы подготовки констант макроячеек и расчета макрополей: Препринт/ИТЭФ. № 101. М., 1990.
6. Конев В.Н., Торлин Б.З. Метод поканального расчета ядерного реактора на основе крупной сетки. Алгоритмы подготовки коэффициентов связи и восстановления поканального распределения нейтронного потока внутри макроячейки: Препринт/ИТЭФ. № 102. М., 1990.
7. Лалетин Н.И. Об уравнениях гетерогенного реактора // *ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов*. 1981. Вып. 5(18). С. 31—53.
8. Майоров Л.В. О расчете констант диффузионных конечно-разностных уравнений для гетерогенного реактора / *ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов*. 1983. Вып. 5(34). С. 3— 17.
9. Rohach A.F. A legendre polynomial nodal model for 2-D diffusion problem // *Ann. Nucl. Energy*. 1986. Vol. 13. № 10. P. 549—558.
10. Koebke K., Hetzell L. On the reconstruction of local homogeneous neutron flux and current distribution of light water reactor from nodal schemes // *Nucl. Sci. and Eng.* 1985. Vol. 91. № 12. P. 123—131.
11. Малофеев В.М. "TREC" — программа трехмерного расчета большого гетерогенного реактора / *ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов*. 1985. Вып. 4. С. 29.

Статья поступила в редакцию
25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер.
Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 51—57.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ, АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НЕЙТРОННОЙ КИНЕТИКИ В РЕАКТОРЕ РБМК-1000

Т.И. Александрова, Ю.В. Гарусов, Л.Г. Кириллова, Б.М. Свечаревский, И.В. Сологуб, А.В. Сытенко

Дается описание программного обеспечения, входящего в состав моделирующей системы, предназначенной для исследования поведения реактора в различных эксплуатационных режимах. Описывается технология проведения вычислительных экспериментов, связанных с исследованием процессов кинетики реактора РБМК-1000.

DEVELOPING METHODS, ALGORITHMS AND PROGRAMS FOR INVESTIGATION OF NEUTRON KINETICS PROCESSES IN RBMK-1000 REACTOR. T.I. ALEKSANDROVA, YU.V. GARUSOV, L.G. KIRILLOVA, B.M. SVECHAREVSKY, I.V. SOLOGUB, A.V. SYTENKO. A description of software is suggested which enters the modelling system designed to investigate reactor behaviour in various operation modes. A technology of conducting calculation experiments related with a study of RBMK-1000 reactor kinetics processes is described.

Одной из основных проблем атомной энергетики является задача повышения эффективности эксплуатации энергоблока. Решение ее неразрывно связано с совершенствованием программного обеспечения и технических средств системы управления реактором. Активная зона РБМК-1000 представляет собой достаточно сложный объект, поведение которого определяется совокупностью различных факторов. Поэтому управление реактором не может быть полностью автоматизировано и роль человека-оператора в принятии решений по управлению объектом весьма велика. При этом помимо фактора эффективности эксплуатации следует учитывать также аспекты, связанные с теплотехнической надежностью и уровнем безопасности реактора. Все это требует высокого уровня квалификации операторского состава, умения адекватно оценивать ситуацию и принимать оптимальные решения. На этапе обучения операторов получение информации о поведении реактора в различных внештатных ситуациях, а также оценка оптимальности тех или иных решений по управлению объектом возможны с помощью привлечения методов вычислительного эксперимента.

Создание программных моделирующих систем, предназначенных для исследования поведения реактора в различных эксплуатационных режимах, представляет несомненный интерес. Состояние реактора в каждый момент времени определяется физическими процессами, протекающими в активной зоне.

Поэтому в основу математического обеспечения системы положена комплексная математическая модель физических процессов, включающих в себя описание процессов нейтронной кинетики в объеме активной зоны, процессов теплопереноса в объеме замедлителя и отражателя, теплогидравлических процессов в технологических каналах. Каждый физический процесс моделируется с помощью своей системы уравнений, один или несколько компонентов которой зависят от параметров физического процесса иной природы [1]. Идеология построения программной моде-

лирующей системы применительно к реактору РБМК-1000 изложена в работе [2].

Организация и проведение вычислительных экспериментов, связанных с исследованием поведения реактора, может проводиться в одной из подсистем (входящих в состав системы):

- для исследования процессов нейтронной кинетики в объеме активной зоны;
- для исследования теплогидравлических процессов в технологических каналах и прилегающем оборудовании;
- для исследования процессов теплопереноса в графитовой кладке.

Алгоритм работы построен таким образом, что по желанию пользователя может производиться как независимое, так и совместное моделирование процессов. Решение о режиме моделирования принимается пользователем в зависимости от выбранной к рассмотрению задачи. В качестве примера таких задач можно привести:

- исследование поведения реактора при аварийном обрыве стержня СУЗ;
- исследование поведения реактора при аварийном срабатывании САОР;
- исследование поведения реактора при переходе на другой уровень мощности;
- исследование поведения реактора при перегрузке кассет с топливом либо дополнительных поглотителей и т.д.

Моделирование этих процессов в системе дает возможность выработать рекомендации по наиболее оптимальному перемещению стержней СУЗ для компенсации внесенного возмущения, а также по изменению других управляющих параметров, таких, как состав продуваемого газа, расходы воды через технологические каналы и т.д.

Анализ множества физических задач позволяет выделить их следующие характерные особенности:

- большие объемы исходной, промежуточной и выходной информации;
- сложные реализуемые алгоритмы;

— необходимость обмена большими объемами информации между различными программами;

— необходимость гибкой и легко изменяемой в зависимости от внешних условий связи между программами.

Информационная среда системы, построенная в соответствии с принципами, изложенными в работе [3], позволяет произвести расчеты на основании исходных данных, полученных с объекта. Эти данные образуют нормативную информацию системы и включают:

- картограмму загрузки реактора;
- картограмму выгораний топлива;
- картограмму положения стержней СУЗ;
- картограмму расходов воды.

Нормативная информация снимается с объекта в фиксированный момент времени и является исходной для расчетов во всех подсистемах. Кроме этой информации в информационную среду системы заносятся ядерные константы, начальное распределение теплового поля в объеме топлива и замедлителя, значения температуры и паросодержания в ряде точек по высоте каждого технологического канала, геометрические размеры и теплофизические характеристики.

Остановимся более подробно на технологии проведения вычислительных экспериментов в подсистеме для исследования процессов нейтронной кинетики. Одной из основных частей программного обеспечения подсистемы является модуль, реализующий математическую модель процессов нейтронной кинетики. Основу модели составляет уравнение нейтронной кинетики в однокрупновом диффузионном приближении, решаемое совместно с системой уравнений для шести средневзвешенных групп запаздывающих нейтронов:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \nabla D \nabla \Phi - \Sigma_a \Phi + (1 - \beta) k_{\infty} \Sigma_a \Phi \exp(-B^2 \tau) + \varphi \exp(-B^2 \tau) \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = \beta_i \frac{k_{\infty}}{\varphi} \Sigma_a \Phi - \lambda_i c_i, \quad i = \overline{1, 6},$$

где Φ — плотность потока нейтронов; v — средняя энергетическая скорость нейтронов; D — коэффициент диффузии; Σ_a — макроскопическое сечение поглощения нейтронов; β — доля запаздывающих нейтронов; K_{∞} — коэффициент размножения в бесконечной среде; B^2 — материальный параметр; τ — возраст нейтронов; φ — вероятность избежать поглощения в спектре Ферми; λ_i — постоянная распада излучателей i -й группы; c_i — концентрация ядер-излучателей i -й группы.

На экстраполированной границе реактора Γ задано условие $\Phi/\Gamma = 0$. Определены начальные условия $\Phi(\bar{r}, 0) = \Phi_0(\bar{r})$, где \bar{r} — обобщенная координата.

Для решения нестационарного уравнения диффузии в однокрупновом приближении (1) применялся метод суммарной аппроксимации с сочетанием с проек-

ционным методом коллокаций [4, 5]. При этом в качестве базисных функций использовались кубические сплайны. Алгоритмическая суть используемых методов заключается в том, что на каждом временном слое осуществлялось покоординатное расщепление исходного уравнения

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = \nabla_x D \nabla_x \varphi_1 + \frac{1}{3} (W \varphi_1 - \Sigma_a \varphi_1 + S);$$

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = \nabla_y D \nabla_y \varphi_2 + \frac{1}{3} (W \varphi_2 - \Sigma_a \varphi_2 + S);$$

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \nabla_z D \nabla_z \varphi_3 + \frac{1}{3} (W \varphi_3 - \Sigma_a \varphi_3 + S),$$

где

$$W = (1 - \beta) k_{\infty} \Sigma_a \exp(-B^2 \tau); \quad S = \varphi \exp(-B^2 \tau) \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i$$

при дополнительных условиях сопряжения

$$\varphi_1(\bar{r}, 0) = \Phi_0(\bar{r}), \quad \varphi_1(\bar{r}, t_j) = \varphi_0(\bar{r}, t_j), \quad \varphi_2(\bar{r}, t_{j+1/3}) = \varphi_1(\bar{r}, t_{j+1/3}), \quad \varphi_3(\bar{r}, t_{j+2/3}) = \varphi_2(\bar{r}, t_{j+2/3}), \quad j = 1, 2, \dots \quad (2)$$

Производные по времени заменялись разностными аналогами:

$$\frac{1}{v} \frac{Y^{j+1/3} - Y^j}{\Delta t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial Y^{j+1/3}}{\partial x} \right) + \frac{1}{3} (W Y^j - \Sigma_a Y^{j+1/3} + S);$$

$$\frac{1}{v} \frac{Y^{j+2/3} - Y^{j+1/3}}{\Delta t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial Y^{j+2/3}}{\partial y} \right) + \frac{1}{3} (W Y^{j+1/3} - \Sigma_a Y^{j+2/3} + S); \quad (3)$$

$$\frac{1}{v} \frac{Y^{j+1} - Y^{j+2/3}}{\Delta t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial Y^{j+1}}{\partial z} \right) + \frac{1}{3} (W Y^{j+2/3} - \Sigma_a Y^{j+1} + S); \quad \Delta t = t_{j+1} - t_j$$

В результате решения (3) с учетом (2) получили решение во всей области на каждом последующем временном слое. Дальнейший алгоритм решения рассмотрим на примере первого уравнения (3), которое сводилось к двухточечной краевой задаче:

$$(p(x) Y^{j+1/3})' + q(x) Y^{j+1/3} = f(x), \quad Y^{j+1/3}(0) = Y^{j+1/3}(1) = 0, \quad x \in [0, 1]. \quad (4)$$

Здесь

$$p(x) = D/R^2, \quad q(x) = - \left(\frac{\Sigma_a}{3} + \frac{1}{v \Delta t} \right);$$

$$f(x) = - \left[\left(\frac{W}{3} + \frac{1}{v \Delta t} \right) Y^j + \frac{S}{3} \right],$$

R — масштабный множитель, численно равный длине отрезка, на котором производится расчет.

Приближенные решения $Y^{j+1/3}$ уравнения (4) находились в виде линейной комбинации базисных функций:

$$F^{j+1/3} = \sum_{i=1}^n b_i \zeta_i(x), \quad (5)$$

где $\zeta_i(x)$ — базисные сплайн-функции; b_i — неизвестные коэффициенты.

В качестве базисных функций с учетом граничных условий использованы кубические сплайны

$$\zeta_i(x) = B_i(x), \quad i = 2, \quad n-1,$$

$$\zeta_1(x) = 4B_1(x) - B_0(x), \quad \zeta_n(x) = 4B_n(x) - B_{n+1}(x), \quad (6)$$

которые имеют следующий вид:

$$B_i(x) = \begin{cases} \frac{1}{4h^3}(x-x_{i-2})^3, & x_{i-2} \leq x \leq x_{i-1} \\ \frac{1}{4} + \frac{3}{4h}(x-x_{i-1}) + \frac{3}{4h^2}(x-x_{i-1})^2 - \\ - \frac{3}{4h^3}(x-x_{i-1})^3, & x_{i-1} \leq x \leq x_i \\ \frac{1}{4} + \frac{3}{4h}(x_{i+1}-x) + \frac{3}{4h^2}(x_{i+1}-x)^2 - \\ - \frac{3}{4h^3}(x_{i+1}-x)^3; & x_i \leq x \leq x_{i+1}; \\ \frac{1}{4h^3}(x_{i+2}-x)^3, & x_{i+1} \leq x \leq x_{i+2}; \\ 0, & \text{при остальных } x; \end{cases}$$

$$\zeta_i(x) = \begin{cases} \frac{3}{4} + \frac{3}{h}(x-x_0)^3 - \frac{3}{4h}(x_1-x) + \frac{3}{h^2}(x-x_0)^2 - \\ - \frac{3}{4h^2}(x_1-x)^2 - \frac{3}{h^3}(x-x_0)^3 + \\ + \frac{3}{4h^3}(x_1-x)^3, & x_0 \leq x \leq x_1; \\ 1 + \frac{3}{h}(x_2-x) + \frac{3}{h^2}(x_2-x)^2 - \\ - \frac{13}{4h^3}(x_2-x)^3, & x_1 \leq x \leq x_2; \\ \frac{1}{h^3}(x_3-x)^3, & x_2 \leq x \leq x_3; \\ 0, & \text{при остальных } x; \end{cases}$$

$$\zeta_n(x) = \begin{cases} \frac{1}{h^3}(x-x_{n-2}), & x_{n-2} \leq x \leq x_{n-1}; \\ 1 + \frac{3}{h}(x-x_{n-1}) + \frac{3}{h^2}(x-x_{n-1}) - \\ - \frac{13}{4h^3}(x-x_{n-1})^3, & x_{n-1} \leq x \leq x_n; \\ \frac{3}{4} + \frac{3}{h}(x_{n+1}-x) - \frac{3}{4h}(x-x_n) + \\ + \frac{3}{h^2}(x_{n+1}-x)^2 - \frac{3}{4h^2}(x-x_n)^2 - \frac{3}{h^3}(x_{n+1}-x)^3 + \\ + \frac{3}{4h^3}(x-x_n)^3, & x_n \leq x \leq x_{n+1}; \\ 0, & \text{при остальных } x, \end{cases}$$

где h — расстояние между узлами сетки.

Подставляя приближенные решения (5) в дифференциальные уравнения, требуем обращения в нуль невязки в определенных точках сетки. При этом их число должно равняться числу неизвестных коэффициентов в приближенном решении. Далее получили искомую систему алгебраических уравнений, которая в матричной форме имеет вид $AB = f$, где A — матрица размера $n \times n$ с элементами a_{ij} ; $c = (c_1, \dots, c_n)$ и $f = (f_1, \dots, f_n)$. При этом матрица коэффициентов имеет трехдиагональную структуру. Элементы матрицы A вычислялись по формулам

$$a_{11} = -27p_1/(2h^2) + 3p'_1/(4h) + 15q_1/4;$$

$$a_{21} = 6p_2/h^2 - 3p'_2/h + q_2;$$

$$a_{ii} = 3p_i/h^2 + q_i, \quad i = \overline{2, n-1};$$

$$a_{i,i+1} = 3p_i/(2h^2) - 3p'_i/(4h) + q_i/4, \quad i = \overline{1, n-2};$$

$$a_{i,i-1} = 3p_i/(2h^2) - 3p'_i/(4h) + q_i/4, \quad i = \overline{3, n};$$

$$a_{n-1,n} = 6p_{n-1}/h^2 + 3p'_2/h + q_{n-1};$$

$$a_{n,n} = -27p_n/(2h^2) - 3p'_n/(4h) + 15q_n/4,$$

где $p_i = p(x_i)$; $p'_i = p'(x_i)$; $q_i = q(x_i)$.

Таким образом, коэффициенты b_1, \dots, b_n линейной комбинации (5) определяются из системы (6) с трехдиагональной матрицей коэффициентов A .

Предложенный метод численного решения уравнений пространственной кинетики имеет ряд преимуществ перед конечно-разностным методом. Они заключаются в понижении размерности решаемой системы линейных уравнений и возможности получения решений в дискретной системе точек пространства.

Использование в качестве базисных функций кубических сплайнов вместо полиномов или тригонометрических функций позволило получить не заполненную, а трехдиагональную матрицу коэффициентов [6]. При программной реализации алгоритма указанного выше метода решения задачи это приводит к уменьшению времени вычисления.

Непосредственному решению уравнения нейтронной кинетики предшествует определение макроскопических сечений поглощения и деления для каждого элементарного объема, на которые дискретизирована область моделирования. При этом учтены геометрические и конструктивные характеристики стержней СУЗ всех типов (ЛАР, ЛАЗ, БАЗ, РР, УСП), обогащение, степень выгорания и температура топлива в технологических каналах, средняя температура графита в элементарных объемах, плотность и температура воды во всех компонентах активной зоны.

Подсистема позволяет выполнить расчеты:

- стационарного поля по объему реактора;
- квазистационарного объемного поля энерговыделения;
- нестационарного объемного поля энерговыделения.

Реализация всех расчетов, проводимых в подсистеме, предполагает на начальном этапе определение стационарного поля энерговыделения. Для нахождения стационарного поля, помимо исходной информации, пользователем с экрана дисплея задаются следующие параметры: уровень мощности, на котором находится реактор; погрешность установления (т.к. задача решается методом установления); итерационный параметр; количество каналов в контрольном объеме; количество расчетных слоев. На ЕС 1061 расчет стационара для 1628 узловых точек занимает 0,2 мин.

По окончании расчета стационара пользователю предоставляется возможность либо завершить работу в системе, либо перейти к моделированию квазистационарного или нестационарного режима, либо произвести аналогичный проведенному расчет стационара, изменив предварительно положение одного или нескольких стержней СУЗ.

В случае решения квазистационарной или нестационарной задачи пользователь задает с экрана интервал и шаг моделирования (при решении стационарной задачи эти параметры равны нулю).

Под моделированием квазистационарной задачи подразумевается исследование поведения реактора на длительном временном интервале с достаточно большим шагом (более 5 мин). При этом производится учет эффектов отравления реактора ксеноном и пользователю предоставляется возможность скомпенсировать отравление с помощью стержней ручного регулирования.

Под моделированием нестационарной задачи подразумевается исследование поведения реактора на коротком временном интервале с шагом по времени, не превышающем одной секунды. Выбранное ограничение на шаг моделирования обусловлено тем, что решение задачи определения поля энерговыделения в каждый момент времени дополнено алгоритмом стержней ЛАР и ЛАЗ.

Реализация квазистационарной задачи в системе осуществляется следующим образом:

1. Задаются интервал и шаг моделирования.
2. Проводится расчет стационара.
3. Вносится изменение в положение одного или нескольких стержней СУЗ.
4. Проводится расчет макроскопических сечений деления и поглощения для новой геометрии области моделирования.

5. Определяется запас реактивности системы на стержнях СУЗ и новый уровень мощности, на который переходит реактор в результате внесения возмущения. (Оператору предоставляется возможность в рамках данного временного интервала провести ряд экспериментов по внесению различных возмущений относительно исходного варианта картограммы загрузки СУЗ и выбрать удовлетворяющий его уровень мощности.)

6. Проводится расчет стационарного поля энерговыделения для нового уровня мощности и с вновь сформированными значениями макроскопических сечений.

После второго обращения к расчету стационара, перемещению стержней СУЗ и соответственно опре-

делению запаса реактивности системы предшествует определение уровня отравления. В связи с тем, что отравление также является возмущающим воздействием для реактора, то оно приводит к изменению интегральной мощности, которая отображается на дисплее. Пользователю предоставляется возможность определить поле энерговыделения в следующий момент времени, не внося дополнительных возмущений в систему, либо скомпенсировать отравление с помощью стержней СУЗ.

Процесс решения задачи заканчивается по истечении заданного времени моделирования. При этом происходит возврат управления в систему.

Реализация нестационарной задачи в системе осуществляется по следующим алгоритмам:

1. Задаются интервал и шаг моделирования.
2. Проводится расчет стационара.
3. Вносится изменение в положение одного или нескольких стержней СУЗ. (Вносимое на каждом шаге изменение глубины погружения при опускании стержня должно быть равно 4τ дм, а при подъеме — 2τ дм, где τ — шаг моделирования в секундах.)
4. Проводится расчет сечений деления и поглощения.
5. Проводится расчет поля энерговыделения с учетом алгоритма работы ЛАР и ЛАЗ.
6. Если интервал моделирования на исчерпан, то проводится расчет следующего временного шага нестационара. При этом по желанию пользователь может вводить или не вводить новые изменения в положение стержней СУЗ. И в одном и другом случае моделированию следующего шага нестационара предшествует перерасчет макроскопических сечений, изменение которых связано как с перемещением стержней СУЗ, ЛАР и ЛАЗ, так и с Доплеровским эффектом, а также с изменением температуры и плотности теплоносителя в каждом технологическом канале.

В основу алгоритма, реализующего модель поведения стержней ЛАР и ЛАЗ, положен принцип работы блока автоматического регулирования. Этот принцип заключается в том, что каждый из зонных регуляторов стержней ЛАР или ЛАЗ, перемещаясь в вертикальном направлении вверх или вниз, компенсирует отклонение поля энерговыделения от значения, определяемого задатчиком мощности. Критерием подключения соответствующего зонного регулятора является превышение плотности потока нейтронов в зоне заданного значения на 1%. Сравнение показаний осуществляется в местах установки триаксиальных внутризонных камер КТВ-17. Если регламентированная задатчиком мощности величина плотности потока отличается от полученной в результате расчета на 5%, то для компенсации отклонения моделируется автоматическое подключение одного, а при необходимости, и второго стержня ЛАЗ.

После расчета каждого шага на дисплее отображается информация об интегральной мощности реактора, наиболее энергонапряженных каналах и каналах, в которых наблюдается превышение линейной нагрузки. Выход из расчета нестационара осуществ-

ляется в систему с последующим выводом необходимой информации на твердую копию.

В результате расчетов, проводимых в подсистеме, на твердую копию в общем случае может быть выведена следующая информация.

1. Сводная картограмма характеристик реактора, в состав которой входят плотность потока нейтронов, мощность, коэффициенты неравномерности по высоте, линейные нагрузки.

2. Интегральная картограмма мощности.

3. Сводные высотные характеристики каналов активной зоны в семи сечениях, включающие плотность потока нейтронов, мощность, коэффициенты неравномерности по высоте, линейные нагрузки.

4. Послойная картограмма энерговыделения.

5. Послойная картограмма плотности потока нейтронов.

6. Послойная картограмма линейных нагрузок.

7. Картограмма отклонений интегрального поля энерговыделения.

Формирование перечня выводимой информации осуществляется пользователем в диалоге с ЭВМ.

С целью представления данных, получаемых в результате нейтронно-физического расчета, в более общем и наглядном виде, используя графические возможности терминала персонального компьютера типа IBM PC AT/XT, была разработана подсистема визуализации результатов расчетов. Данные моделирования нейтронной кинетики с ЕС ЭВМ, используя сеть либо передачу файлов на дискетах, переносятся в ПЭВМ. Затем пользователь на экране дисплея имеет возможность получить графическое изображение активной зоны реактора, где разным уровням мощности каналов соответствуют различные цвета. Специальным образом отмечены каналы с СУЗ и ДП, а стержни СУЗ, изменившие свое положение, отображаются мерцающими. Постоянно пользователю доступны две "картинки" с изображениями, соответствующими разным временным слоям, поэтому он может сравнивать и отслеживать, как менялось поле мощности во времени (данные для новых временных слоев оперативно считываются из файлов). Кроме того, на экране существует небольшое текстовое окно, где помещена наиболее важная цифровая информация, например текущий временной шаг, общая мощность реактора, запас реактивности на стержнях СУЗ, данные об изме-

нении положения стержней регулирования и наиболее энергонапряженных каналах.

Существует режим выбора и более подробного рассмотрения любой подобласти реактора. Возможно также изменить масштаб изображения произвольным образом. По желанию пользователь может просмотреть числовые значения данных по любому выбранному каналу, а также с помощью специального блока настройки изменить диапазоны и цвета отображаемых мощностей.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Комплексная математическая модель физических процессов в активной зоне РБМК-1000/Л.Г. Кириллова, И.Ю. Новицкий, Л.В. Поплавская, И.В. Сологуб//Системные исследования в энергетике /Ин-т проблем энергосбережения АН УССР. Киев. 1988. С. 118—123.
2. Александрова Т.И., Кириллова Л.Г. Проектирование модульной системы автоматизации научных исследований в ядерной энергетике//Теплометрия, энерго- и ресурсосбережение /Ин-т проблем энергосбережения АН УССР. Киев. 1989. — С. 49—57.
3. Александрова Т.И., Кириллова Л.Г. Функциональный состав программной системы автоматизации научных исследований в атомной энергетике//Проблемы энергоснабжения. 1990. № 4. С. 33—36.
4. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977.
5. Ортега Дж., Пул У. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1986.
6. Моделирование физических процессов в локальных областях активной зоны энергетического реактора/Л.Г. Кириллова, И.Ю. Новицкий, И.В. Сологуб, А.В. Сытенко//Вычислительная техника и краевые задачи. Методы и средства проектирования и параллельной обработки /Риж. политехн. ин-т. Рига. 1988. С. 21—27.

Статья поступила в редакцию

25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 58—62.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ТРЕНАЖЕРЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

В.Ф. Ковтунов, С.И. Симоненко

По результатам экспериментальных исследований методом имитационного моделирования аварийных ситуаций, отказов систем управления, отказов оборудования на тренажере ЯЭУ получены некоторые статистические данные деятельности операторов по обнаружению аномалий и распознаванию отказов в условиях дефицита времени.

EXPERIMENTAL STUDY OF MAN-COMPUTER INTERACTION UNDER ACCIDENTS AT NPP. V.F. KOVTUNOV, S.I. SIMONENKO. Using the results of experiments by a method of simulating accidents, control system failures, equipment failures at NPP simulator some statistical data on operator's activity concerning the abnormal behaviour finding out and failure identifying under restricted time.

Для разработки человеко-машинного интерфейса требуется знание элементов деятельности оператора, в наибольшей степени снижающих надежность выполнения оперативных задач, в частности определения технического состояния объекта управления. Необходимо также определить причины типичных ошибок, проявляющихся в конкретных видах деятельности операторов.

Анализ ошибок операторов необходим и в связи с попытками моделирования человеко-машинного взаимодействия в аварийных или экстремальных режимах в условиях дефицита времени. Здесь требуется определить вероятное поведение оператора в зависимости от динамики процесса.

Один из методов изучения деятельности человека-оператора по диагностированию объекта управления (в нашем случае — энергетической установки) заключается в изучении его стратегии поведения, алгоритмов деятельности по обнаружению различных отказов на основе экспериментальных данных и наблюдений, получаемых при имитационном моделировании на полномасштабных тренажерах.

К экспериментальным данным, полученным путем имитационного моделирования, необходимо относиться с большой осторожностью, т.к. существует ряд факторов, приводящих к существенным различиям моделируемого процесса реальной действительности. Однако при полном отсутствии статистически достоверных реальных данных получаемые при моделировании результаты можно использовать в качестве оценок. В пользу таких исследований говорит и то, что у профессиональных операторов, как правило, существует уже сложившаяся стратегия деятельности, имеются свои стереотипы, устоявшиеся алгоритмы и приемы анализа информации, которые, скорее всего, не изменятся или деформируются несущественно в имитационных экспериментах.

В предлагаемой работе приведены некоторые результаты экспериментальных исследований, проведенных на исследовательском тренажере ЯЭУ с двумя пультами управления в 1984—1988 гг. в Научно-исследовательском технологическом институте.

Обеспечение экспериментальных исследований. Эксперименты проводились на исследовательском тренажере ЯЭУ с реактором водо-водяного типа для проектируемых судов Морфлота СССР. Тренажер предназначен для исследований человеко-машинного взаимодействия, отработки различных технических решений по управлению установкой и тренировок операторов.

Тренажер позволяет имитировать различные аварийные режимы с отказами оборудования во всех подсистемах установки.

В состав тренажера входят два пульта управления с различным информационным обеспечением:

— пульт традиционного для Морфлота СССР типа с мнемосхемой, стрелочными, узкопрофильными и цифровыми показывающими приборами;

— дисплейный пульт с отображением непрерывных параметров и мнемосхемы на двух цветных дисплеях.

Использовалась также комбинация пульта традиционного типа с цветным дисплеем для выдачи дополнительной информации оператору (рекомендаций, предупреждений) в текстовом виде. В другой комбинации для этих же целей имитировалась система речевого вывода.

Для вывода тренажера в желаемое исходное состояние, задание аварийных ситуаций и отказов он содержит пульт руководителя обучения или экспериментатора.

Оценка изменения функционального состояния операторов при работе с различными интерфейсами производилась по изменению времени реакции операторов за время экспериментальной вахты. Время реакции измерялось на специальном приборе.

В эксперименте участвовали профессиональные операторы со стажем работы 5—8 лет.

Статистические оценки надежности диагностирования. Исходя из определений надежности АСУ (ГОСТ 24.701—86) под надежностью диагностирования предлагается понимать свойство человеко-машинной системы правильно определять техническое состояние объекта управления в различных условиях эксплуатации за заданное время. Показателем надеж-

ности диагностирования может служить вероятность обнаружения аномалии и правильной интерпретации причин ее возникновения за время, необходимое для обеспечения ее устранения или перехода в новое управляемое состояние.

В экспериментальных исследованиях этот показатель определялся следующим образом. Тренажер выводился в заданный стационарный режим, и оператор осуществлял наблюдение за установкой по средствам представления информации. Без предупреждения вводился отказ или авария в подсистемах установки или в системе управления. Это проявлялось на пульте показаниями соответствующих приборов и сигнализаторов. Аварии (течи первого контура, разрывы трубопроводов второго контура, прекращение подачи охлаждающей воды через конденсатор и т.п.) требовали немедленного вмешательства по их локализации. Отказы (засорение фильтров, уменьшение расхода охлаждающей воды, обесточивание электроприводов, отказы в системе дозирования питательной воды, в измерительной системе и т.п.) приводили либо к развитию аварийной ситуации, либо к необходимости изменения заданного режима (снижению мощности, отключению части оборудования). В любом случае требовалось вмешательство оператора для дистанционного управления или руководства персоналом местных постов. Кроме того, проводились и аварийные режимы с наложением отказов в системе управления. Здесь оператору необходимо было своевременно обнаружить неотработку автоматикой аварийного алгоритма и выполнить его дистанционно, наблюдая за ходом режима. Задача диагностирования считалась выполненной, если оператор обнаруживал и распознавал отказ или аварию и своевременно выполнял необходимые действия.

Выполнение одной задачи одним оператором в исследованиях составляло один опыт. Задачи для экспериментов выбирались экспертным путем по принципу максимального учета возможных типов отказов (аварий) по подсистемам. Предполагалось равновероятное возникновение отказов (аварий).

Точечная оценка вероятности успешного диагностирования определялась по отношению числа опытов, в которых оператор справился с выполнением задачи диагностирования, к общему числу опытов. Доверительные интервалы определялись по приближенной формуле вычисления доверительных границ [1] для доверительной вероятности $P = 0,98$.

Исследования показали, что надежность диагностирования зависит как от нагрузки оператора, так и от значимости отказа. Операторы субъективно подразделяют отказы, возникающие в различных системах установки, на три вида: малозначимые, значимые и особозначимые. Малозначимые отказы — отказы, не приводящие к существенным изменениям режима установки. Значимые отказы приводят к существенным изменениям режима, но не требуют немедленного вмешательства. Особозначимые отказы приводят к развитию опасных аварий и требуют немедленного вмешательства оператора.

Экспериментальная оценка надежности диагностирования показала, что в аварийных ситуациях, когда аномалия в работе установки еще не привела к общей аварии и обнаруживается по изменению одного—трех параметров, значимость отказа еще не влияет на надежность его обнаружения и идентификации (интерпретации). Для пульта традиционного типа надежность диагностирования в предаварийных режимах оценивается значением $P = 0,91$ с доверительным интервалом /0,83; 0,96/. Использование в пульте цветного дисплея с отображением аналоговой информации в виде гистограммы отклонений параметров от заданного (эталонного) значения несколько улучшило надежность диагностирования, которая оценивается величиной $P_d = 0,94$ с доверительным интервалом /0,88; 0,97/. При развитии или внезапном возникновении аварии с наложением отказов надежность диагностирования снижается, причем существенное значение имеет оценка значимости отказов. Здесь вероятность обнаружения малозначимого отказа находится в пределах /0,3; 0,6/, значимого — /0,6; 0,85/, особозначимого — /0,75; 0,9/.

Некоторые особенности и ошибки в деятельности операторов. 1. О ш и б к и ф и л ь т р а ц и и н ф о р м а ц и и. В аварийных ситуациях с большим числом дискретной сигнализации об изменении состояния механизмов и положения арматуры, предупредительной и аварийной сигнализации, с изменениями показаний на большинстве пультовых приборов, звуковой сигнализацией и сообщениями с местных постов практически скачкообразно увеличивается нагрузка оператора. Понятие “нагрузка человека-оператора” в системе человек-машина хорошо интерпретируется Д. Мейстером [2]. В процессе восприятия информации происходит фильтрация — отсеивание ненужного. При увеличении нагрузки количество “отброшенной” оператором информации возрастает.

Имитационные эксперименты показали, что оператор часто отбрасывает информацию не после того, как он ее считал, проанализировал и решил, что она не нужна для дальнейшей интерпретации события, а еще перед операцией считывания. При этом может быть “отброшена”, т.е. не считана нужная информация, даже если она находилась в поле зрения оператора. Сложившаяся в сознании оператора модель состояния установки, полученная на основе выбранной информации, может быть довольно устойчивой, оператор может выдать должное или желаемое за действительное, что, естественно, скажется на его действиях по локализации аварии.

Иллюстрацией влияния нагрузки на процессы фильтрации информации может служить доля невыполненных из-за ошибок фильтрации задач к общему числу невыполненных задач. Так, для аномальных или предаварийных режимов без наложения отказов она составила 43%, а для аварийных режимов с наложением отказов — 84%.

Обобщая многочисленные наблюдения за работой операторов, можно назвать три основные причины ошибок, обусловленных фильтрацией:

— если несколько приборов характеризуют общую ситуацию, то при дефиците времени оператор, как правило, оценивает процесс по одному из них;

— если первоначальные признаки процесса соответствуют целевым, то при дефиците времени оператор может прекратить дальнейшее наблюдение за процессом;

— если при выполнении оперативной задачи появляется информация, не связанная непосредственно с выполняемой задачей, или, по мнению оператора, является несущественной, он ее может не воспринять.

2. О ш и б к и и н т е р п р е т а ц и и. Процесс интерпретации информации является основным в принятии решения при диагностировании, поэтому его надежность играет важную роль в системе человек-машина. На "надежность" процесса интерпретации влияет большое число факторов, обусловленных как человеком, так и техникой. Поведение оператора при принятии решения исследовалось ранее в разных ситуациях и на различных моделях /2/. По результатам таких исследований приводится обширный перечень и анализ факторов, влияющих на процесс принятия решения, делаются обобщающие выводы:

"... поведение часто бывает непоследовательным. Для решения диагностической задачи... он стремится использовать простые линейные модели."

"Диагнозы, сделанные даже самым опытным оператором, часто бывают весьма сомнительными".

"Принимающий решение оператор вырабатывает гораздо меньше альтернативных реакций, чем требуется, и при этом способен использовать лишь небольшое количество критериев. Он упрощает ситуации принятия решения путем концентрации только на одной или двух наиболее очевидных характеристиках задачи".

Все из приведенных утверждений в той или иной степени были подтверждены и нашими экспериментальными исследованиями при имитации некоторых аварийных ситуаций. Например:

— разрыв контура питательной воды, приводящий к падению уровня в конденсаторе, оператор воспринимал как плохую работу регулятора уровня в конденсаторе, не предполагая возможных альтернатив;

— течь (разрыв) паропровода, приводящая в первую очередь к некоторому падению давления пара, воспринималась как отказ или плохая работа регулятора давления;

— падение расхода охлаждающей воды, приводящее к повышению давления в конденсаторе, воспринималось как слишком большое травление пара;

— резкое увеличение расхода питательной воды при имитации отказа системы дозирования питательной воды воспринималось в первые моменты времени как отказ датчика.

В приведенных примерах видно, что оператор в процессе интерпретации и принятия решения о состоянии установки рассматривал одну наиболее простую

альтернативу, не предполагая и не проверяя каких-либо других. Из всего числа зарегистрированных ошибок ошибки, обусловленные неправильной интерпретацией, в предаварийных режимах составили 50%, в аварийных — 7%.

3. Д р у г и е о ш и б к и. В условиях дефицита времени в аварийных ситуациях оператор может совершить и другие ошибки, обусловленные повышенной нагрузкой. Например, наблюдались следующие ошибки в действиях после принятия решения по результатам диагностирования:

— ошибки из-за прерывания выполнения одной задачи появлением новой, после выполнения которой оператор не возвращался к предыдущей;

— ошибки "обратных действий": оператор знал, что в заданном режиме необходимо снижать температуру, но выполнял обратную операцию;

— ошибки, обусловленные высокой значимостью с одновременной малой вероятностью аварийной ситуации: оператор в ходе процесса не мог принять никакого решения;

— ошибки из-за субъективной переоценки значимости ситуации, когда оператор вмешивался в процесс, практически не задумываясь ("не было времени"), усугубляя влияние отказа.

Ошибок такого рода, как правило, существенно меньше остальных. Вероятность возникновения таких ошибок, видимо, в большей степени зависит от психофизиологических и личностных качеств человека, чем, например, от системы представления информации. Однако при проектировании систем управления необходимо учитывать, что такие ошибки возможны, и рассчитывать на то, что в условиях быстротечности серьезной аварии человек может не справиться даже с принятием решения по ее локализации, не говоря уже о соответствующих действиях.

Работа с системой оперативной поддержки. Исследования показали актуальность создания систем поддержки оператора (СОП) для оказания помощи в предотвращении развития и локализации аварии. Для экспериментальных исследований создан макет СОП. Система осуществляла наблюдение за установкой, выявляла аномалии в работе оборудования и сообщала о них оператору. Каждому сообщению экспертным путем был присвоен свой вес в зависимости от влияния обнаруженной аномалии или отказа на безопасность. Поэтому при имитации аварий с наложением отказов первым появлялось сообщение, требующее экстренного вмешательства. Этим осуществлялась автоматическая фильтрация информации — выделение наиболее актуальной части информационного потока.

Наблюдения показали, что в аварийной ситуации в условиях дефицита времени операторы предпочитают короткие сообщения, указывающие направление деятельности по предотвращению или локализации аварии. Подробную инструкцию на дисплее оператор практически не читает, затруднителен для восприятия и большой поток речевой информации. Все это было учтено при создании экспериментальной системы поддержки.

Оценить влияние СОП на повышение безопасности ядерной энергетической установки можно по критерию вероятности успешного предотвращения или локализации развивающейся аварии — решения аварийной задачи. Для получения таких оценок имитировались аварийные ситуации с отказами в системе управления. В этих ситуациях своевременное и правильное вмешательство оператора предотвращало остановку реактора (срабатывание аварийной защиты) или аварию оборудования с необратимыми последствиями. По результатам эксперимента получены оценки вероятности решения аварийной задачи для пультов с разным информационным обеспечением. При работе за пультом традиционного типа без системы поддержки эта вероятность оценивается как $P_{АЗ} = 0,4$ с доверительным интервалом /0,3; 0,55/. Обеспечение автоматической фильтрации при использовании СОП позволяло оператору быстрее “включаться” в процесс локализации аварии и своевременно вырабатывать конкретный план действий по решению аварийной задачи. При отображении сообщений и рекомендаций на дисплее (ДСОП) вероятность решения аварийной задачи существенно повысилась, хотя операторы не всегда своевременно их воспринимали, $P_{АЗД} = 0,7$ с доверительным интервалом /0,5; 0,82/. Сообщения и рекомендации в речевом виде не только не отвлекали оператора от решения аварийной задачи, но даже повысили надежность его деятельности: $P_{АЗР} = 0,86$ с доверительным интервалом /0,66; 0,94/.

Анализ влияния систем оперативной поддержки на напряженность деятельности операторов. При воздействии на человека-оператора неблагоприятных факторов, таких, как: повышенная трудность задач, дефицит времени на осмысливание и осуществление целенаправленной деятельности, повышенная значимость ошибочных действий и ряд других, возникает психическое состояние утомления. Степень изменения функционального состояния организма можно оценить по изменению времени реакции.

Утомление — это сложное явление, зависящее не только от тяжести работы, но и от индивидуально-психологических свойств человека. Нами предпринята попытка оценить качество предлагаемых человеко-машинных интерфейсов с помощью этого показателя. Статистической обработке подвергались данные латентного периода простой двигательной реакции t_1 и реакции выбора из двух альтернатив t_2 до и после экспериментальной вахты.

Анализ работы человека-оператора без СОП, по данным простой двигательной реакции, показал значимое снижение работоспособности (с $P = 0,99$) к концу вахты, что проявилось в увеличении t_1 в среднем на 10 % и увеличении стандартного отклонения σ_{t_1} в 2—3 раза. При работе с ДСОП или РСОП отсутствует значимое отличие в функциональном состоянии организма операторов до и после каждой вахты, продолжительность которой составляла два часа, стабилизиро-

валось и σ_{t_1} . Предполагается, что именно СОП повлияла на деятельность оператора и стабилизировала показатели функционального состояния организма.

На основании экспериментальных данных высказывается следующая гипотеза: на процесс работы с ДСОП влияют личностные свойства операторов. Так, у трех операторов с характеристиками индивидуально-психологической направленности личности на явления собственного субъективного мира (интроверты) количество обращений к ДСОП растет, а время с момента обнаружения аномалии в работе установки до момента обращения к ДСОП — уменьшается пропорционально показателю индивидуальной тревожности. Для оператора с характеристиками индивидуально-психологической направленности личности на мир внешних объектов (экстраверт) низкая личная тревожность и высокая степень эмоциональной устойчивости не являются определяющими в выборе стратегии пользования ДСОП. В этой ситуации он действовал как высокотревожный, активируя свою психическую деятельность за счет внешнего источника (цветной дисплей).

Более частое и раннее обращение к ДСОП снижает напряженность умственной деятельности, что определяется по времени простейших мыслительных действий $t_2 - t_1$. У операторов при работе с ДСОП выработалась индивидуальная стратегия. Так более независимыми в отношении ДСОП оказались операторы с высоким уровнем субъективного контроля, хотя прямые результаты деятельности (число ошибок и обнаруженных отказов) свидетельствуют об их неадекватной самооценке.

При работе с РСОП влияние личностных особенностей сказывается в меньшей мере, чем в ДСОП, что связано с директивным стилем работы РСОП, не учитывающей состояние человека.

Считаем, что РСОП желателно применять самостоятельно или совместно с ДСОП в напряженных режимах, особенно для операторов с высокими показателями субъективного контроля, т.к. они в основном полагаются только на свои силы и, несмотря на то что делают большое число ошибок, вовремя не пользуются подсказкой ДСОП.

Заключение. Имитационный эксперимент аварийных ситуаций на судовой ЯЭУ показал, что основными причинами ошибок, снижающих общую надежность человеко-машинной системы, являются фильтрация и интерпретация информации операторами.

Облегчение или автоматизация фильтрации информации с помощью простых систем поддержки позволяет существенно повысить надежность человеко-машинной системы и безопасность эксплуатации ЯЭУ.

Эффектным оказалось использование в системах поддержки речевого вывода информации, особенно для оператора с высокими показателями субъективного контроля.

Список литературы

1. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества/Пер. с нем. М.: Мир, 1970.
2. Мейстер Д. Экономические основы разработки сложных систем/Пер. с англ. М.: Мир, 1979.

3. Бойко Е.Б. Время реакции человека. М., 1964.

Статья поступила в редакцию
25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер.
Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 63—67.

УДК [621.311.25:621.039]:658.3.012

КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫЕ УЧЕБНО-ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ЗАНЯТИЯ НА ПЭВМ УЧЕБНО-ТРЕНИРОВОЧНЫХ ПУНКТОВ ВУЗОВ И АЭС

В.В. Охотин, В.И. Плютинский, Н.Д. Кузнецов, Н.Г. Барыкова, А.И. Балашов, Г.А. Кузин

Рассматриваются вопросы построения учебно-тренировочных занятий на ПЭВМ для профессиональной подготовки персонала, специализирующегося в области эксплуатации основного технологического оборудования АЭС и систем автоматизации.

COMPUTERIZED CLASSES FOR TRAINING PC IN TRAINING CENTRES OF HIGH SCHOOLS AND NPP. V.V. OKHOTIN, V.I. PLYUTINSKY, N.D. KUZNETSOV, N.G. BARYKOVA, A.I. BALASHOV, G.A. KUZIN. Problems of structuring training classes with PC to conduct professional training of staff majoring in the field of using basic technological equipment of NPP and automation systems are dealt with.

В процессе подготовки специалистов для атомной энергетики все больший удельный вес приобретает использование персональных ЭВМ в качестве технических средств обучения и тренировки [1]. Наибольший эффект от их применения достигается при формировании (на начальных этапах обучения) и совершенствовании (в процессе периодических тренировок) навыков оперативного мышления, а также в качестве средства для подготовки к работе на участках и полномасштабных тренажерах. Универсальный характер ПЭВМ открывает широкие возможности для визуального представления информации о ходе технологического процесса; отсутствие реального моторного поля компенсируется последующим обучением на других типах тренажеров. Эффективность использования ПЭВМ в системе профессиональной подготовки персонала АЭС подтверждают данные о том, что тренировку 80% операторских навыков можно проводить на технических средствах, обладающих только 30%-й степенью подобия [2].

При создании компьютеризированных учебно-тренировочных занятий на ПЭВМ для учебно-тренировочных пунктов вузов и АЭС используется возможность автоматического (автоматизированного) контроля знаний и действий обучаемых. Сам процесс обучения строится таким образом, чтобы вмешательство руководителя обучения (инструктора) было минимальным.

Типовая структура компьютеризированного учебно-тренировочного занятия включает прохождение обучаемым входного контроля знаний, выполнение содержательной части занятия и выходной контроль. Задачей входного контроля является проверка подготовленности обучаемых к выполнению данного занятия.

Он может реализоваться как путем представления обучаемому фиксированного вопроса из заранее подготовленного списка (со случайным изменением порядка следования вариантов ответов при каждом обращении к вопросу), так и автоматическим конструированием вопроса на основе порождающих грамматик [3]. На аналогичных принципах строится и выходной контроль знаний, задачей которого является проверка усвоения обучаемыми содержательной части занятия.

В учебно-тренировочном пункте МЭИ для обучения студентов специализации АСУ АЭС разработаны и используются учебно-тренировочные занятия следующего содержания:

— изучение динамических характеристик автоматического и дистанционного управления основным оборудованием первого контура энергоблока ВВЭР-1000;

— анализ и выбор технических решений по оптимальному управлению энергоблоком ВВЭР-1000 в режиме отключения питательного турбонасоса (ПТН);

— изучение дистанционного и автоматического управления мощностью реактора ВВЭР-440;

— анализ и поиск неисправностей в схемах измерения теплотехнических параметров АЭС;

— обучение составлению логических схем управления на базе элементов универсального комплекса технических средств (УКТС).

Учебно-тренировочные занятия по изучению динамических характеристик, автоматического и дистанционного управления энергоблоком ВВЭР-1000, техническим решениям по режиму отключения ПТН

строятся на основе использования диалогового тренажера [4], разработанного на базе ПЭВМ класса *IBM PC XT/AT*. В режиме "Схема" диалоговый тренажер обеспечивает представление изображения упрощенной мнемосхемы энергоблока ВВЭР-1000, на которое накладываются цифровые значения контролируемых параметров, состояние управляемых органов (задвижек, клапанов, насосов, нагревателей и пр.). Режим "Графики" создает возможность одновременного вывода на экран восьми важнейших контролируемых параметров энергоблока (рис. 1). Выбор параметров для вывода в режиме "Графики" осуществляется из меню, содержащего 40 типов важнейших параметров и состояний управляемых органов энергоблока.

Моделируется основное технологическое оборудование первого контура энергоблока ВВЭР-1000 с соответствующими подсистемами автоматизированного управления. В качестве аварийных вводных используется самопроизвольное падение группы кассет реактора, течи теплоносителя в первом контуре и пара во втором, сброс (наброс) нагрузки турбогенератором, отключение ПТН, несрабатывание (ложное срабатывание) устройств автоматики, заклинивание запорных и регулирующих органов, потеря индикации контролируемых параметров, а также различные комбинации указанных возмущений. Для обеспечения эффективного обучения имеется возможность ускорения, замедления и останова процесса моделирования.

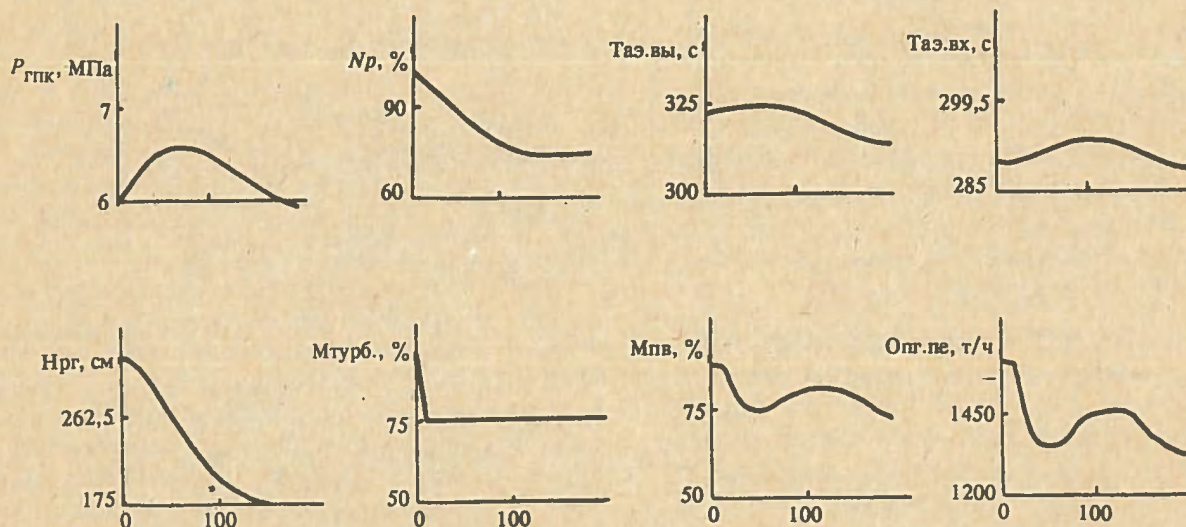


Рис. 1. Графики контролируемых параметров диалогового тренажера

Дистанционное управление состоит из следующих операций: поиск нужного органа, переключение выбранного органа с автоматического на дистанционное, собственно, управление выбранным органом. Все эти операции осуществляются с помощью клавиш "Home" ("автомат—дистанционное управление"), "PgUp" ("больше"), "PgDn" ("меньше"), "Ins" ("стоп"). Состояние "автоматическое дистанционное управление", направление дистанционного воздействия "больше—меньше" специальным образом, как и состояние управляемого объекта индицируются в соответствующих местах экрана.

По истечении 600 с работы модели или при нажатии клавиши *F4* осуществляется переход в режим "Анализ", в котором на восьми графиках можно проследить ход процессов за время работы модели. При желании каждый из графиков можно вызвать на экран по отдельности вместе с таблицей, содержащей числовые данные о текущем и остальных семи параметрах, изменяющих свои значения при перемещении маркера по графику основного параметра.

При изучении динамических характеристик, автоматического и дистанционного управления энергоблоком обучаемые проходят последовательно учебно-тренировочные занятия по реактору, компенсатору давления, парогенератору и всему энергоблоку ВВЭР-1000. В качестве примера на рис. 1 представлена копия экрана ПЭВМ с графиками основных контролируемых параметров энергоблока при сбросе нагрузки турбины на 20%. В ходе учебно-тренировочного занятия по техническим решениям в режиме отключения ПТН обучаемые исследуют эффективность предложенных технических решений путем выбора способов и характеристик оптимального управления энергоблоком на основе анализа динамических процессов.

Условием выбора является минимизация отклонений уровня в парогенераторах при выполнении технологических ограничений на величину отклонения важнейших контролируемых параметров энергоблока.

При изучении дистанционного и автоматического управления мощностью реактора ВВЭР-440 моделируются динамика реактора, регулятор типа АРМ-5, си-

система дистанционного управления группами АРК и система аварийной и предупредительной защиты реактора. На дисплей может быть выведена мнемосхема, в графической и цифровой форме изображающая положение групп АРК. Другим вариантом является вывод мнемосхемы регулятора АРМ-5 с указанием состояния выходных сигналов. На обеих мнемосхемах указывается текущее значение мощности, периода и факт срабатывания защит.

Имеется возможность дистанционного управления АРК в диапазоне потока нейтронов от уровня источника до номинального, а также включения и отключения АРМ. Может быть задано возмущение по реактивности, величина которого определяется инструктором. Переходные процессы (нейтронный поток, положение АРК) регистрируются в виде графиков и также могут быть выведены на дисплей. Цикл учебно-тренировочных занятий по анализу и поиску неисправностей в схемах измерения теплотехнических параметров АЭС включает изучение схем дифманометрического уровнемера, расходомера, термоэлектрического термометра и термометра сопротивления, которое базируется на типичных случаях неисправностей, наиболее часто встречающихся в условиях эксплуатации [5]. Так, для схемы дифманометрического уровнемера имитируются следующие повреждения: 1) течь минусовой импульсной трубки; 2) течь плюсовой импульсной трубки; 3) засорение плюсовой импульсной трубки; 4) разгерметизация плюсовой камеры дифманометра; 5) разгерметизация минусовой камеры дифманометра; 6) течь чувствительного элемента; 7) затирание плунжера дифманометра.

Программное обеспечение каждого из занятий позволяет осуществить поэтапный анализ правильности действий при включении дифманометра в работу (для схем уровнемера и расходомера), определить возможные ошибки сборки измерительного комплекта (для средств измерения температуры), проанализировать поведение измерительного комплекта при появлении неисправностей.

На рис. 2 представлена информация, выводимая обучаемому на экран ПЭВМ в ходе учебно-тренировочного занятия, посвященного изучению схемы дифманометрического расходомера. При выполнении операций продувки обучаемый воздействует на состояние семи вентилях В1 + В7. Неверное управление вентилями вызывает появление предупреждающих сообщений, при правильном управлении появляются сообщения, разрешающие дальнейшее выполнение занятия.

При поиске заданной инструктором неисправности обучаемый, изменяя состояние вентилях или воздействуя на схему электрических соединений, наблюдает за реакцией вторичного прибора на эти изменения. Анализируя реакции, обучаемый должен определить заданный инструктором характер неисправности. Занятие заканчивается после отработки обучаемым всех видов неисправностей.

Учебно-тренировочные занятия с элементами системы УКТС включают обучающую и тренирующие программы. Обучающая программа содержит сведения о назначении и основных обозначениях логических элементов и/или временной задержки, триггера и т.п. Усвоение материала контролируется рядом вопросов,

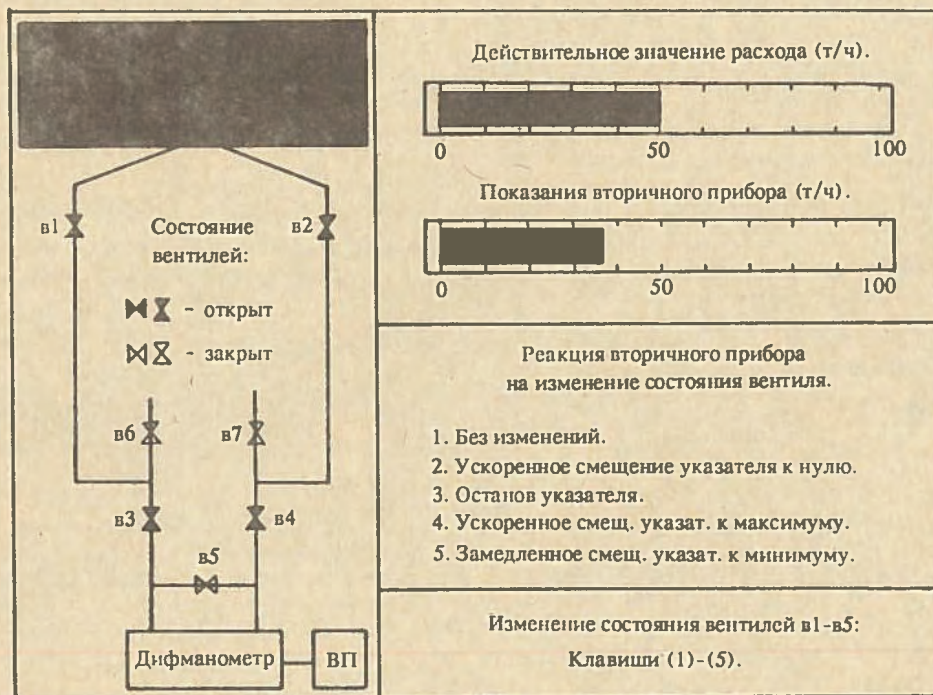


Рис. 2. Пример представления информации на экране ПЭВМ при изучении схемы дифманометрического уровнемера

сопровождаемых выводом на экран ПЭВМ условных обозначений логических элементов и их комбинаций.

В основу первой тренирующей программы по работе с элементами УКТС положена достаточно сложная схема логического управления, содержащая 11 независимых входов и 2 выхода: прямой и инверсный. Обучаемый, имея на экране ПЭВМ указанную схему, должен задать такие комбинации логических сигналов 0 и 1 на входы, которые вызывают срабатывание схемы (их число более сотни). Работа с программой завершается после того, как найдено 20 правильных решений.

Вторая тренирующая программа по элементам УКТС призвана научить читать реальную схему технологической защиты энергоблока ВВЭР-1000, моделирующую на ПЭВМ "течь 2-го контура" (рис. 3). Обучаемый должен найти измерительные каналы

(входы XI—X16), при исчезновении сигнала на которых система еще может функционировать. При этом необходимо не только найти максимально возможное число отказов измерительных каналов, но и их сочетание (что позволяет детально усвоить работу сложной схемы, значение терминов "отказ схемы", "ложное срабатывание схемы").

Опыт разработки и использования в процессе подготовки специалистов для атомной энергетики ПЭВМ, обеспечивающих хорошие возможности для визуального представления информации, наряду с использованием игрового метода общения человека с ЭВМ и возможностью автоматизации процесса обучения, позволяет сделать вывод об эффективности применения компьютеризированных учебно-тренировочных занятий на ПЭВМ учебно-тренировочных пунктов вузов и АЭС.

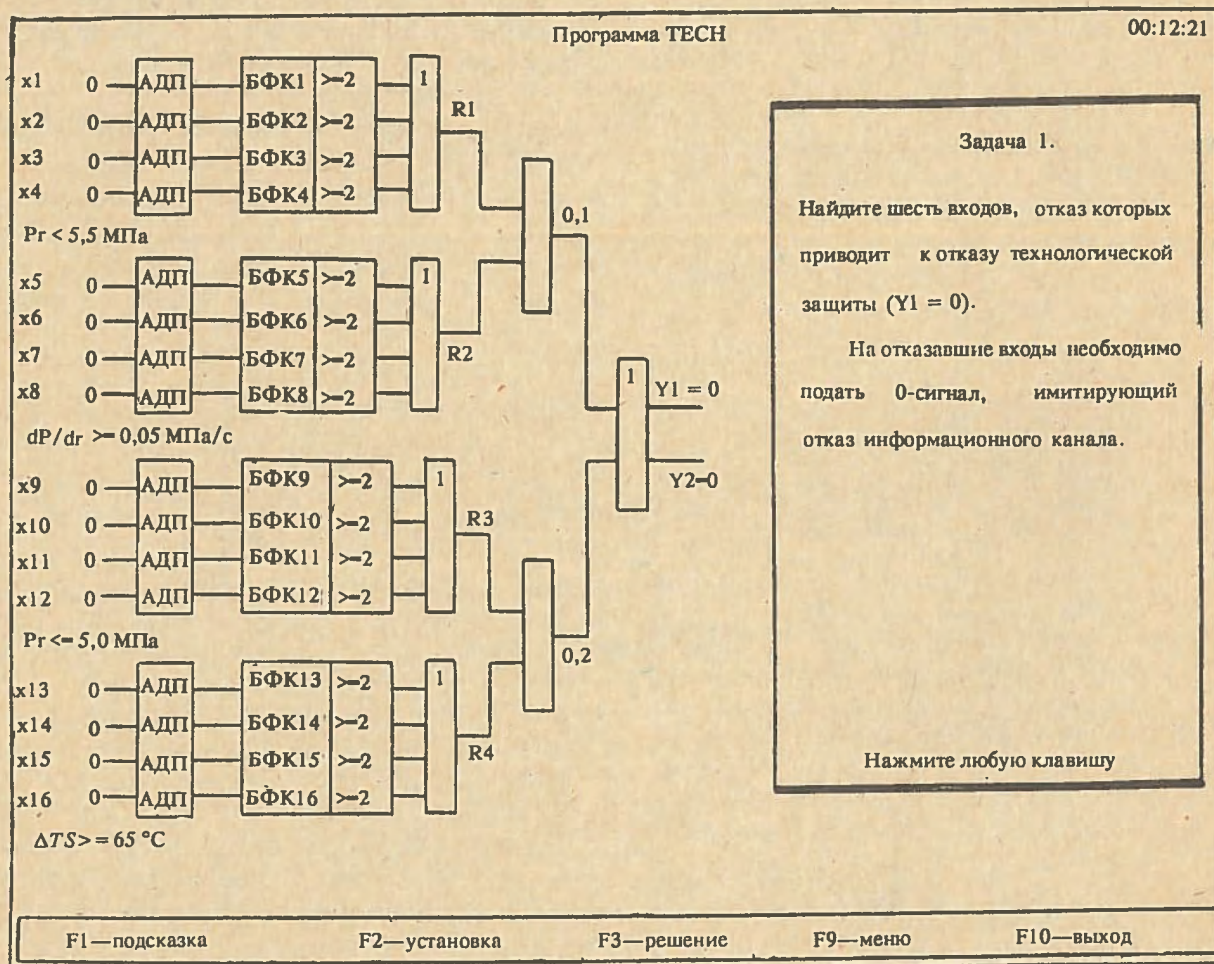


Рис. 3. Информация, выводимая обучаемому в учебно-тренировочном занятии "Течь второго контура"

Список литературы

1. Po Li-Chi Cliff. PCTTRAN: a transient analysis code for personal computers//Nuclear Engineering International. 1988. 33. № 406. P. 47—48.
2. Martin H.-D., Bennewitz F. Part tack trainer application: the KWV nuclear plant analyser and the KWV functional trainer//Man-Mach. Interface Nucl. Ind.: Proc. Int. Conf. Tokyo. 15—19 Febr. 1988. — Vienna. 1988. — P. 167—179.
3. Круг Г.К., Кабанов В.А., Черных А.В. Инструментальные диалоговые обучающие системы на микроЭВМ//Микропроцессорные средства и системы. 1987. № 3. С. 29—30.
4. Охотин В.В., Балашов А.И. Диалоговый тренажер на базе ПЭВМ для энергоблока ВВЭР-1000//Электрические станции. 1990. № 7. С. 21—25.
5. Ястребенецкий М.А., Иванова Г.М. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами. М.: Энергоатомиздат, 1989.

Статья поступила в редакцию
25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер.
Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 67—71.

УДК 681.03.06

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОБУЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ПЕРСОНАЛА АЭС С РЕАКТОРОМ ТИПА БН

*А.И. Ворopaев, Н.В. Галкин, А.И. Зинин, И.З. Королев, А.С. Кукса,
Б.М. Липанов, А.А. Макаров, О.И. Макаров, В.А. Руденко*

Излагаются подходы и некоторые проблемы использования технических средств обучения эксплуатационного персонала АЭС. Описываются программные средства для разработки микротренажеров на ПЭВМ. Даются характеристики микротренажеров, разработанных для учебно-тренировочного пункта Белярской АЭС.

ROLE OF TECHNICAL MEANS WHEN ORGANIZING A TRAINING PROCESS FOR NPP PERSONNEL. A.I. VOROPAYEV, N.V. GALKIN, A.I. ZININ, I.Z. KOROLEV, A.S. KUKSA, B.M. LIPANOV, A.A. MAKAROV, O.I. MAKAROV, V.A. RUDENKO. Approaches and certain problems of using technical means for NPP personnel training are discussed. Program products for developing micro-simulators with the aid of a personal computer are described. Micro-simulators developed for a training centre at Belyarskaya NPP are characterized.

В системе подготовки эксплуатационного персонала сложных и потенциально опасных производств в большинстве развитых стран принята 4-фазная система подготовки, включающая:

Базовые знания. Обучаемый получает общие сведения об обслуживаемой технике, физических процессах, барьерах и принципах безопасности.

Технологические знания. Достаточно подробно изучается состав, конструкция, рабочие параметры, типовые отказы, порядок операций для технологических систем, которые обучаемый будет эксплуатировать.

Практические навыки. Обучаемый способен решать типовые проблемные задачи с учетом взаимодействия подсистем, приобретает логику профессионального мышления, способен выполнять будущие функциональные обязанности в пределах должностных инструкций.

Уровень профессионального умения. Специалист хорошо ориентируется в незнакомой и нестандартной ситуации, включая тяжелые аварии.

Говоря о подготовке персонала АЭС, многие авторы отмечают два важных момента:

а) усложнение установок, рост степени их автоматизации резко изменили понятия "практические навыки" и "профессиональное умение"; на первый план выходит задача формирования в сознании информационных моделей, навыков познавательной, диагностической деятельности и их постоянное совершенствование в учебно-тренировочных пунктах (УТП) и центрах (УТЦ).

б) Количество обучаемых в 30—50 раз превышает число инструкторов.

Как справиться с таким потоком и организовать контроль? По французским данным время, отводимое на обучение одного работника АЭС, составляет более 90 учебных часов в год.

Решение этих проблем ищется в насыщении учебных центров и пунктов комплексом технических средств обучения. Наряду с традиционной поддержкой учебного процесса (макеты, планшеты, кинофильмы) получают все большее распространение компьютерные средства, позволяющие использовать: видеозапись, мультипликацию, видеографику для наглядного объяснения, показа динамических режимов, "внутренностей" узлов и систем и их взаимодействия.

В учебном процессе сегодня применяются разнообразные имитирующие устройства: от самых простых (иллюстрация теории), до сложных и дорогих полномасштабных тренажеров.

В то время достаточно очевидно, что любое наращивание компьютерной техники не заменит добротность и логичную организацию учебного процесса.

Сегодня нет ответа на многие вопросы, например:

а) Каково соотношение между точностью воспроизведения объекта и передачей навыков? На этапе первоначального обучения слишком подробное воспроизведение объекта приводит к информационной перегрузке и падению эффективности имитационного устройства. По мнению ряда авторов 80% навыков и умений могут быть получены при уровне подобия 30% [1].

б) Психологическая, поведенческая точность воспроизведения может быть важным фактором. Шум, вибрации, температура могут влиять на диагностику. Немного известно о том, как вводить стресс в обучающее устройство. Мало данных по кривым обучения и распада (удержания навыков).

в) Нет единого мнения по логике организации учебного материала. При нисходящей структуре (от всего объекта к частностям) многие понятия не определены. При восходящей (от элемента к системе или всему объекту) возникают трудности с мотивацией. Вообще говоря, приспособление тренировочного устройства к познавательному стилю и способностям обучаемого — одна из наиболее трудных проблем. Наличие многих теоретических моделей оценки способностей обучаемого само по себе указывает на сложность вопроса.

г) Имеются большие различия в организации, эксплуатации, отборе, обучении и лицензировании персонала, социально-экономических условиях зарубежных и отечественных АЭС.

Количество персонала на единицу мощности у нас в 4—6 раз больше. У нас меньше интеграция систем управления, более низкая надежность оборудования, что усложняет весь процесс обучения.

Сегодня практика на отечественных АЭС такова, что носителем основных "секретов" эксплуатации является немногочисленный опытный, работающий с начала монтажа, персонал. Без знания этих секретов трудно создать содержательный учебный процесс.

На наш взгляд, широким кругом специалистов, работающих в атомной энергетике, не осознаны до конца последствия выполняемых в развитых странах широкомасштабных программ по человеко-машинному взаимодействию, вероятному анализу безопасности,

экспертным системам. Общее, что объединяет эти программы — разработка подхода и аппарата формализации, структурирования, машинного описания базы знаний по всему энергоблоку. Такие понятия, как деревья и цепочки событий, отказов, ошибок; таблицы и деревья решений, цепочки перехода отказов в аварии, тонкие эффекты взаимодействия систем и т.д. составляют существенную часть техпроекта и эксплуатационных документов и главную "начинку" технических средств обучения, что позволяет быстро создать новые сценарии обучения.

Анализируя возможности оснащения УТП единичных и малосерийных блоков (БН-350, БН-600, Библинская АЭС) техническими средствами, мы пришли к выводу, что желательно резко не ломать сложившуюся в течение многих лет систему. Суть ее: теоретическая подготовка—обучение на рабочем месте—экзамен—допуск к работе. Речь должна идти о постепенном "вживлении" имитирующих устройств на базе одиночных или объединенных в сеть ПЭВМ в существующий учебный процесс.

На наш взгляд, только накопив на этом пути достаточный опыт, можно переходить к разработке полномасштабных тренажеров для таких энергоблоков (программно-технический комплекс и его добротное учебно-методическое обеспечение).

Основные направления работ по быстрым реакторам в 1990 г. В этом году параллельно со сбором технологических данных для полномасштабного тренажера было решено приступить к разработке имитационных обучающих устройств (микротренажеров) на ПЭВМ для ряда технологических систем БН-600.

Работы велись по следующим направлениям:

— создание интегрированной системы построения и отладки математических моделей [2, 3];

— разработка специальных средств для автоматизированной сборки информационно-моторных полей и их связи с математической моделью [4];

— создание семи микротренажеров (МТ) по конкретным технологическим системам БН-600.

В разработанных МТ использовались различные подходы к отображению и управлению, организации учебного процесса. Все они поставлены на БАЭС, проходят опытную эксплуатацию и доработку.

Редактор для автоматизированной сборки информационно-моторных полей и связь их с математической моделью [4]. При разработке редактора предполагалось, что все отображаемые переменные содержатся в общем для всех программ массиве, описание структуры которого находится в отдельном файле.

Входная информация, необходимая для работы редактора, включает:

— файл описания отображаемых переменных;

— файлы фоновых изображений в растровом виде (стандартный объем 112 К);

— файл — библиотеку описаний приборов (набор примитивов, их параметры в относительных координатах); описания приборов доступны для редактирования любым текстовым редактором.

Описание состоит из двух частей:

- постоянной (не изменяется при работе МТ);
- переменной (изображения показаний приборов, возможно редактирование).

На выходе редактора реализуется:

- файл — массив структур описаний приборов для подсистем ввода-вывода МТ;
- файл растровый — полное изображение панели управления и моторного поля.

Элемент массива первого файла содержит следующие данные:

- тип прибора (для вызова подпрограммы вывода показаний данного типа приборов);
- координаты и размер на экране;
- способ преобразования на экране ($ax-b$, $1/x$, $\log x$);
- адрес, связанный с переменной.

Редактор работает в интерактивном режиме, снабжен развитой системой меню.

Типовая процедура редактирования включает:

- выбор нужного прибора управления или показывающего по номеру или образцу;
- выбор места и размера прибора на экране;
- уточнение изображения прибора (подписи, цвета отдельных элементов, разметка шкал и т.д.);
- выбор связанной с прибором переменной;
- выбор способа и параметров преобразования переменной.

Редактор позволяет удалять любой прибор, набирать совокупные изображения из ранее подготовленных фрагментов.

Графический редактор для подготовки постоянной части изображений в дисплейных динамических тренажерах [5]. Позволяет создать и вести базу рисунков на диске. Прилагаемая к редактору функция воспроизведения может встраиваться в прикладные программы пользователя и обеспечивает сравнительно быстрый вывод готового рисунка (весь экран или часть его).

Редактор предназначен для работы на ПЭВМ типа *IBM PC/AT* под управлением операционной системы *MS-DOS* версия 3.3 или выше. Предполагается, что графический адаптер поддерживает режим *EGA* и/или *VGA* с разрешением не менее 640 элементов раstra по горизонтали и не менее 16 цветов.

Каждая команда рисования (линия, окружность, прямоугольник, краска области, дуга окружности и т.д.) связана со специальной клавишей, а также представлена в дополнительном меню, откуда их можно выбирать для исполнения. Имеется встроенный строчный редактор для ввода текстов, надписей, имен файлов и координат области.

Характеристика разработанных микротренажеров (МТ).

МТ для обучения основным принципам цепной реакции в быстром реакторе [6, 7]. Состоит из трех основных компонентов: динамической модели активной зоны, учебной (упрощенной) модели пульта управления, на-

бора файлов, содержащих информацию о технологических параметрах и сценариях обучения.

Используется точечное уравнение кинетики с параметрическим заданием основных обратных связей, три группы псевдоисточников остаточного энерговыделения. При расчете температурного поля используются уравнения сохранения энергии для одиночной сборки.

В процессе работы обучающий может загрузить и выгрузить топливные пакеты, изменить положения стержней регулирования, аварийные установки, изменить расход и температуру теплоносителя на входе в реактор, мощность пускового источника, использовать автомат поддержания мощности и т.д.

Модель может работать в режиме реального времени, с ускорением (до 500 раз) и замедленно.

Учебный процесс организуется в виде лабораторных работ по темам:

- проверка работоспособности систем управления и защиты (СУЗ);
- набор критической массы (кривая обратного умножения, определение "веса" стержней и т.д.);
- измерение градуировочной характеристики стержня АР методом разгона;
- измерение эффектов реактивности (мощностной, температурный, из-за выгорания).

МТ поставляется с двумя готовыми сценариями. В первом — реактор загружен, все стержни СУЗ в активной зоне, во втором — реактор на мощности 93% номинала.

Разработка новых сценариев может осуществляться руководителем обучения путем изменения трех текстовых файлов.

Для демонстрации эксплуатационной физики водородного реактора небольшой мощности. Модель основана на предыдущей, добавлена изотопная кинетика отравителей и изменен расчет теплообмена (в первом МТ теплоноситель — натрий).

У обучаемого имеются в распоряжении три экрана:

- панель с ключами управления и показывающими приборами;
- "оживленная" технологическая мнемосхема;
- экран с графиками (выводятся любые 8 параметров из 60).

МТ позволяет в наглядной и понятной форме продемонстрировать загрузку реактора, запас и баланс реактивности, выгорание, стационарное и нестационарное отравление, йодную яму, температурные и мощностные эффекты, типовые неисправности в тракте питательной воды.

МТ для турбогенератора ТГВ-200М-2МУЗ [8]. Разработаны следующие сценарии занятий:

- возбуждение и холостой ход;
- включение в сеть и синхронизация;
- некоторые аварийные режимы по возбуждению;
- регулирование активной и реактивной мощности;
- переход с рабочего на резервное возбуждение.

На экране монитора воспроизведена панель с ключами и показывающими приборами. Она максимально приближена к реальному рабочему месту на блочном щите управления (БЩУ) третьего блока Белоярской АЭС (БН-600). Математическая модель — логическая. Она “подогнана” под реальные параметры (защиты, блокировки, характерные броски и запаздывания и т.д.) БН-600.

Обучаемый, войдя в один из сценариев, должен действовать в соответствии с эксплуатационными инструкциями. Имеется возможность просмотреть ролик с образцовыми действиями.

Все действия обучаемого могут протоколироваться и автоматически воспроизводиться для разбора.

МТ для схемы собственных нужд [9]. Предназначен для отработки навыков оперативных переключений в схеме собственных нужд. Реализуются следующие ситуации:

- переход на резервный ввод;
- проверка АВР секции;
- запуск и останов дизель-генератора.

Информационно-моторное поле максимально приближено к реальности. Модель — логическая, с “подгонкой” под реальные параметры. Действия в строгом соответствии с эксплуатационными инструкциями.

Возможны два режима работы МТ: обучение и экзаме́н.

МТ для турбоустановки К-200-130-ЗЛМЗ [10]. Обеспечивает понимание динамики следующих основных режимов в рамках первоначальной подготовки:

- пуск ТГ из холодного и горячего состояния по упрощенной схеме;
- останов;
- срывы и наброски нагрузки на турбине;
- изменение уровня в ПВД и ПНД;
- понижение температуры острого пара перед турбиной;

- изменение уровня в деаэраторе и конденсаторе.

По сравнению с реальной технологической схемой отсутствуют дренажные трубопроводы, подпитка и очистка питательной воды, баковое ремонтное хозяйство и редко используемая арматура.

Модель в простой форме имитирует:

- теплообменники с сосредоточенными параметрами;
- полуэмпирические формулы для эффективности теплообмена;
- насосы нерегулируемые;
- турбина с идеальным регулированием.

Обучаемый непосредственно на технологической схеме может управлять регулируемой стопорной арматурой, насосами, вызывать фрагменты на “телевизор”, запускать, останавливать модель.

Параметры выводятся на “телевизор” и три самописца. Имеется возможность изменять некоторые внешние параметры (например, тепловой поток со стороны парогенератора).

МТ на сегодня не полностью отражает реальные характеристики БН-600. Доработка модели и уточнение сценариев обучения будет проведена после завершения опытной эксплуатации на БАЭС.

МТ по основам динамики второго контура [11]. Наглядно демонстрирует динамику второго контура. По сравнению с реальной схемой в нем не моделируются ремонтные, пусковые трубопроводы, некоторая арматура.

МТ для управления ГЦН [12]. Предназначен для закрепления следующих практических навыков:

- подготовка ГЦН 1,2 к работе (есть некоторые различия в их управлении);
- пуск на асинхронно-вентильном каскаде (АВК);
- пуск на реостатно-контакторном управлении (РКУ);
- регулирование скорости вращения на АВК и РКУ;
- переход на РКУ с АВК на режим коротко замкнутого ротора и наоборот.

Информационное и моторное поля близки к реальным панелям. Модель — логическая схема, подогнанная под реальные параметры.

Рабочее место инженера по управлению парогенератором [13]. Имеет наиболее полное изображение. На экран выдаются три любых фрагмента панелей и пультов (всего фрагментов 11, приборов и “ручек” свыше 200). Все фрагменты достаточно близки к реальным на БЩУ БН-600.

Управление — выбор ключей, кнопок, кнопок-табло, уставок и т.д. (всего 183) с помощью “указателя”. Управление ключами (выбор, подсветка и т.д.) близко к реальности.

Математическая модель реализуется в виде гидравлических сетей (часть второго контура, третий контур в объеме основного питательного тракта, ПГ, ветви промперегрева, модули ОП и ПП моделируются сосредоточенными, используется функция эффективности теплообменника, испаритель моделируется с использованием трех зон. Общее число уравнений 200. Время на шаг моделирования составляет 0,5 с (286 процессор). Модель рассчитана на отработку неисправностей в основном в питательном тракте. Разработано 80 сценариев неисправностей (не считая вариантов их размещения по секциям ПГ).

Процесс обучения строится следующим образом. Обучаемый с помощью входного меню вызывает сценарий (по номеру или случайным образом). На панелях и пультах отображается состояние, характерное для номинальной мощности. Через одну минуту включается сценарий, необходимо “бороться”. При неправильных действиях автоматически отключается секция или вся петля по штатной схеме. Введена возможность (специальное окно) обращаться к персоналу смены с требованием вручную закрыть (открыть) арматуру, сбросить нагрузку и т.д.

Действия обучаемого протоколируются и могут быть воспроизведены для разбора. Автоматизированной оценки действий, как и во всех других МТ, нет.

Некоторые замечания по технологии разработки микротренажеров. Сначала идет сбор технологической информации. При работе с проектной, эксплуатационной документацией получают большие массивы справочной информации, которая удобно хранится в виде дерева. Информацию о реальных режимах работы блока удобно хранить в виде графиков. Создан макет системы для просмотра и редактирования такого типа данных, занесена информация (200 показаний датчиков) по останову и пуску БН-600 (6 Мбайт в символическом виде).

Система отображения объемных информационных полей требует продуманной смены фрагментов. По-видимому, переход на локальную сеть с несколькими мониторами (или ПЭВМ) и даже использование графических станций с высоким разрешением кардинально не решает проблему. Современные ПЭВМ представляют богатые возможности для имитации перемещения взгляда обучаемого по информационному полю. Создание такой системы требует привлечения психологов и опытных технологов.

Для обучения кроме реальных пультов и технологических схем требуется быстро выводить дополнительную информацию в виде таблиц, текста, графиков. Была создана программа быстрого вывода через вторую страницу видеопамети; при заполнении страницы происходит автоматическое сжатие графиков и изменение масштаба времени. Для редактирования графиков (масштаб, цвет, надпись, сетка) создан встроенный редактор таблиц.

Разработка имитационных учебных устройств сегодня резко сдерживается производительностью доступной вычислительной техники. Уменьшить остроту этой проблемы может лишь детальная проработка сценариев учебных занятий на этапе, предшествующем программной реализации.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Su Y.L. A Review of the Literature on Training Simulator: Technical Report/Georgia Institute of Technical Center Man-Machine System. 1984.
2. Техническое задание на создание интегрированной системы для разработки и анализа моделей технологического оборудования АЭС (система ПРИМ): Препринт/ФЭИ, ОНТИ. № 32-27/4. Обнинск, 1989.
3. Зинин А.И. Интегрированная система для разработки и анализа исследовательских моделей технологического оборудования АЭС//См. наст. сб. С. 89—92.

4. Редактор для автоматизированной сборки информационно-моторных полей и связи их с математической моделью. Техническое описание и инструкция по эксплуатации: Препринт/ФЭИ, ОНТИ. № 32-27/10. Обнинск, 1990.
5. Графический редактор для подготовки постоянной части изображений в дисплейных динамических тренажерах. Техническое описание и инструкция по эксплуатации: Препринт/ФЭИ, ОНТИ. № 32-27/11. Обнинск, 1990.
6. Микротренажер для обучения основным принципам управления цепной реакцией в быстром реакторе. Техническое описание и инструкция по эксплуатации: Препринт/ФЭИ, ОНТИ. № 32-27/15. Обнинск, 1990.
7. Методические указания по организации учебного процесса на микротренажере по теме "Физический пуск реактора и измерение эффектов реактивности": Препринт/ФЭИ, ОНТИ. № 32-27/16. Обнинск, 1990.
8. Микротренажер для отработки навыков управления турбогенератором ТГВ-200М-2МУЗ. Возбуждение, синхронизация, включение в сеть. Техническое описание и инструкция по эксплуатации: Препринт/ФЭИ, ОНТИ. № 32-27/21. Обнинск, 1990.
9. Микротренажер для отработки навыков оперативных переключений в схеме собственных нужд. Техническое описание и инструкция по эксплуатации: Препринт/ФЭИ, ОНТИ. № 32-27/26. Обнинск, 1990.
10. Понятийный микротренажер турбоустановки К-200-130-ЗЛМЗ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации: Препринт/ФЭИ, ОНТИ. № 32-27/27. Обнинск, 1990.
11. Микротренажер для изучения основ динамики второго контура быстрого реактора. Техническое описание и инструкция по эксплуатации: Препринт/ФЭИ, ОНТИ. № 32-27/28. Обнинск, 1990.
12. Микротренажер для отработки навыков управления ГЦН быстрого реактора. Техническое описание и инструкция по эксплуатации, рекомендации по организации учебного процесса: Препринт/ФЭИ, ОНТИ. № 32-27/30. Обнинск, 1990.
13. Микротренажер для отработки навыков эксплуатации парогенератора (неполадки в питательном тракте). Техническое описание и инструкция по эксплуатации, рекомендации по организации учебного процесса: Препринт/ФЭИ, ОНТИ. № 32-27/31. Обнинск, 1990.

Статья поступила в редакцию
25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 71—75.

ПРОГРАММА ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИИ НА ПЭВМ ОСОБЕННОСТЕЙ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ РБМК

М.Е. Гладышев, В.В. Позняков, В.П. Сивоконь

На примере разработанной в ИАЭ им. И.В. Курчатова учебно-демонстрационной программы по системе безопасности РБМК обсуждается проблема наглядного графического отображения динамических процессов для разработчиков тренажеров, моделирующих комплексов, автоматизированных рабочих мест.

A PROGRAM TO DEMONSTRATE THROUGH PC THE PECULIARITIES AND EFFICIENCIES OF RBMK CONTROL AND PROTECTION BODIES. M.E. CLADYSHEV, V.V. POZNYAKOV, V.P. SIVOKON. Using as an example a training and demonstrating program concerning the RBMK safety system developed in I.V. Kurchatov Atomic Energy Institute a problem of visual graphic mapping the dynamic processes for designers of simulators, simulating complexes and workstations is discussed.

Успешное развитие персональных вычислительных средств и распространение их в сферы профессиональной деятельности позволяет качественно улучшить решение многих традиционно сложных технических проблем. Одна из них — проблема наглядного графического отображения многомерных динамических процессов, актуальная для разработчиков тренажеров, автоматизированных рабочих мест и моделирующих комплексов, а также для пропаганды технических достижений и рекламы, необходимой для обеспечения конкурентоспособности атомных станций.

В предлагаемой работе описаны концепция, опыт создания и технические характеристики действующей учебно-демонстрационной программы по исполнительной части системы управления и защиты (СУЗ) РБМК. Эта программа по сути является графической базой данных для разрабатываемого персонального тренажера в этой области знаний.

Цель и назначение программы. Основанием для разработки программы явилась необходимость повышения уровня квалификации специалистов-разработчиков и оперативного персонала АЭС в вопросах, связанных с радикальной модернизацией СУЗ РБМК, а также очевидная необходимость формирования научно обоснованного общественного мнения в отношении развития атомной энергетики. Большой объем работ и разнообразие новых конструктивных решений, внедряемых в СУЗ РБМК в рамках упомянутой модернизации, обусловлены выполнением правительственной программы работ по обеспечению надежности и безопасности действующих и сооружаемых АЭС с РБМК.

Известно, что за рубежом и в СССР разработаны и успешно используются тренажеры — анализаторы динамических процессов АЭС, реализованные в режиме реального времени на микро-ЭВМ [1, 2]. Эти анализаторы, однако, ориентированы на водо-водяные реакторы, в которых пространственные нейтронно-физические процессы менее существенны, чем в РБМК. Кроме того, в анализаторах выходная информация представляется либо графически, либо численно на фоне статической мнемосхемы. Более наглядное пре-

дставление информации можно реализовать с помощью динамических графических изображений — компьютерных фильмов.

Цель представляемой работы — наглядное графическое отображение на экране дисплея конструктивных особенностей всех основных регулирующих органов (РО) РБМК и динамической эффективности при их использовании в режимах аварийной защиты (АЗ) (как автономно, так и в комбинациях) с различными формами аксиального распределения плотности нейтронного потока реактора.

Основные технические характеристики. В программе рассмотрены все основные регулирующие органы РБМК, включая разрабатываемые, эксплуатируемые и бывшие в эксплуатации, например стержень РР-АЗ первоначальной конструкции с поглотителем длиной 5 м, временем перемещения от верхнего до нижнего концевика 18 с и эффективностью 0,1 бета; стержень АЗ с поглотителем длиной 6,25 м, временем перемещения 12 с и эффективностью 0,11 бета; стержень БАЗ с поглотителем длиной 7,25 м, временем перемещения 2,3 с и эффективностью 0,13 бета; орган ДАЗ с газом-поглотителем нейтронов гелий-3, временем ввода газа 0,8 с, эффективностью 0,08 бета и др.

Для всех РО, поименованных выше, запрограммированы статические изображения, поясняющие их конструкцию, и динамические изображения — компьютерные фильмы, иллюстрирующие их динамическую эффективность в режиме АЗ (рисунок).

В каждой динамической картине показано:

- движение стержня (работа РО);
- изменение аксиального распределения плотности нейтронного потока;
- изменение реактивности (аварийной, вносимой РО и результирующей).

Предусмотрены два варианта демонстрации: демонстрация динамической эффективности РО и демонстрация эффективности различных режимов аварийной защиты. В первом случае одновременно демонстрируются движение выбранных РО, изменение аксиальной формы поглощающей способности стержня,

Стержень РР — АЗ (L=6,2 м)

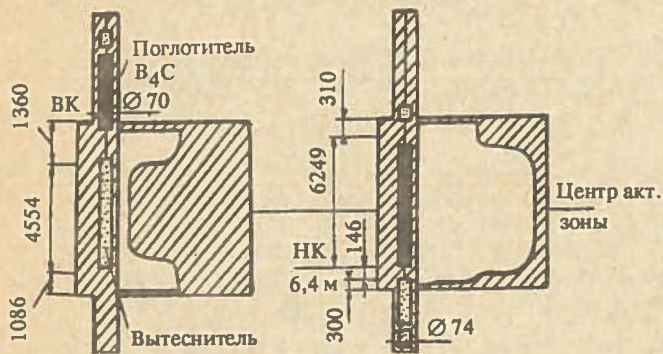
Сборка 1971

Начальное положение

Конечное положение

ВК=0; ПВТ — нет;

ТЕЛ=1,36 м



В демонстрационном варианте: 187 ст., вес — 15, время ввода — 18 с

Динамическое изображение регулирующих органов РБМК

изменения вносимой ими реактивности и аксиального распределения плотности нейтронного потока. В качестве демонстрационных режимов АЗ во втором случае представлены:

— режим АЗ-1 (АЗ-5) (далее просто АЗ) в варианте 1986 г.;

- режим АЗ с новыми стержнями АЗ и УСП;
- режим автономной БАЗ;
- режим БАЗ-АЗ без стержней УСП;
- режим БАЗ-АЗ со стержнями УСП;
- режим ДАЗ и др.

При демонстрации режимов АЗ на экране одновременно показано движение всех типов органов, участвующих в реализации исследуемого режима АЗ, а также графики реактивности и аксиального распределения нейтронного потока аналогично первому случаю.

Расчет демонстрационных процессов выполнен по распределенной одномерной модели нейтронной кинетики [3]. Для демонстрации процессов при максимальной проектной аварии (МПА) использовано приближение, по которому за время 0,9 с вводится положительная реактивность 0,9 бета, а при ПА эта же реактивность вводится за 10 с.

Опыт создания и перспективы развития. Рассмотрены две основные возможности создания динамических изображений на ПЭВМ: с помощью графических пакетов зарубежного производства, таких, например, как пакет *Fantasy*, и посредством программирования на языках с развитой графической поддержкой, например на языке Си. Однако оказалось, что доступные советскому пользователю графические пакеты либо

предназначены для создания слайдовых изображений (*Show, PaintBrush* и др.), либо накладывают жесткие ограничения на количество одновременно демонстрируемых движений (*Fantasy*). Поэтому несмотря на известные преимущества создания изображений с помощью графических пакетов, связанные с ускорением и упрощением программирования, был выбран путь непосредственного программирования изображений на языке Си [4].

Основной концепцией обсуждаемой работы является техническая реализация для обучения проверенного временем принципа: "лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать". В связи с тем, что далеко не все устройства и процессы ядерного реактора можно увидеть даже персоналу АЭС (не говоря уже о населении, имеющем право решать вопросы о развитии энергетики на своей территории), а также в связи с тем, что увиденное на АЭС часто трудно сопоставить с тем, что есть или может быть на других станциях, тривиальная по замыслу задача превращается в достаточно сложную. Необходимо "наглядно показать, раскрыть особенности, обучить и сформировать научно-обоснованное мнение".

Разработанная учебно-демонстрационная программа, судя по отзывам пользователей, где она установлена, позволяет успешно решить эту задачу. Авторы выражают глубокую благодарность за поддержку в работе научному руководителю профессору Малкину С.Д.

Список литературы

1. The Westinghouse TREAT nuclear plant analyzer/Y. Paternoster, J. Boucau, V. Hancart, G. Desadeleer. // Proc. of European Nuclear Conferences. 1990. Lyon. France. Sept. 1990. P. 1630—1632.
2. Охотин В.В., Балашов А.И. Диалоговый тренажер на базе ПЭВМ для энергоблока ВВЭР-1000 // Электрические станции. 1990. № 7. С. 21—25.
3. Сивоконь В.П., Позняков В.В. Особенности кинетики реактора с неравномерным распределением делящихся изотопов // Атомная энергия. 1990. Т. 69. Вып. 5. С. 330—332.
4. Гладышев М.Е., Позняков В.В., Сивоконь В.П. Графическое отображение динамических процессов с помощью средств ПЭВМ // Доклад, представленный на семинар МАГАТЭ по применению ЭВМ для анализа безопасности АЭС, Москва, май 1990.

Статья поступила в редакцию

25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 76—77.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЯЭУ

А.А. Шаленинов, Т.А. Кузнецова, С.А. Наумов,
Е.А.Клушин, В.Ф. Ревенко

Описывается система автоматической генерации программ моделирования непрерывных процессов САМСОН, реализованная авторами на персональной ЭВМ IBM PC. Кратко излагаются принципы ее построения. Приведен пример описания задачи на входном языке МИФ.

PROGRAMMING THE NPP DYNAMICS MODELLING PROBLEMS COMPUTERIZED. A.A. SHALENINOV, T.A. KUZNETSOVA, S.A. NAUMOV, E.A. KLUSHIN, V.F. REVENKO. A system of automated generation of programs to simulate continuous processes SAMSON is described which was realized by the authors using IBM PC. Briefly formulated are the principles of its construction. An example of describing the problem in MIF input language is offered.

Математическое моделирование на ЭВМ ядерных энергетических установок требует разработки и реализации большого количества разнообразных математических моделей и систем моделей, описывающих динамику и статику моделируемых объектов — моделей широкого спектра по точности, сложности, объему и назначению.

Однако разработка и реализация на ЭВМ математических моделей являются в настоящее время длительным и трудоемким процессом, не позволяющим полностью раскрыть те огромные потенциальные возможности, которыми обладает метод математического моделирования.

Идеальным решением проблемы было бы, конечно, создание некоей “суперинтеллектуальной” системы автоматизации моделирования, которая воспринимала бы описание объекта и постановку задачи моделирования на языке конструктора, технолога, расчетчика-исследователя и т.д. и автоматически строила бы вычислительную программу моделирования объекта или прямо выдавала бы результаты расчетов (или “разумные” диагностики, если в описании объекта или постановке задачи имеются какие-либо ошибки).

Однако задачи моделирования динамики ЯЭУ настолько сложны и многообразны, что говорить сейчас о создании системы автоматизации моделирования для них, в вышеуказанном смысле, видимо, можно только для некоторых довольно частных подклассов.

Традиционный процесс математического моделирования на ЭВМ состоит из трех основных фаз:

- построение математической модели (вывод уравнений);
- реализация модели на ЭВМ (программирование);
- использование модели (многократный счет по программе).

Первая фаза является в настоящее время истинно творческой, требующей знания предметной области, законов физики объекта и т.п. Вторая фаза более рутинна и можно вести речь о ее автоматизации.

Авторами данной статьи разработана и реализована на персональной ЭВМ система автоматизации программирования САМСОН (Система Автоматизации Моделирования Сложных Объектов Непрерывного типа). САМСОН является “интеллектуальной” системой, способной “понимать” и решать уравнения. Система берет на себя всю работу по алгоритмизации модели и составлению программы для ЭВМ, включая построение вычислительной схемы решения задачи, проведение аналитических выкладок по преобразованию и разрешению уравнений математической модели, генерацию текстов программ на языке программирования (Фортране). Кроме того, САМСОН производит точную проверку исходного математического описания и постановки задачи на непротиворечивость и полноту путем анализа топологии модели и задачи, осуществляет статический и динамический контроль и диагностику многих других ошибок пользователя, которые тот может допустить при формулировке задачи.

Сгенерированная системой результирующая программа не нуждается в отладке. Отлаживается только исходное математическое описание. Для такого рода отладки в системе САМСОН предусмотрены соответствующие удобные диалоговые средства.

Автоматическая генерация программ в системе САМСОН. Ниже кратко описывается, с точки зрения пользователя, процесс автоматического построения системой САМСОН программ моделирования. Входной информацией для системы является математическое описание объекта моделирования и задание на генерацию программы. Выходной информацией системы является текст сгенерированной программы на языке Фортран.

Для того чтобы воспользоваться системой САМСОН для генерации программы моделирования, пользователь должен подготовить математическое описание объекта моделирования. Математическое описание может состоять в общем случае из обыкновенных дифференциальных уравнений, алгебраических

(трансцендентных) уравнений, описания “логики”. Описание “логики” может содержать:

- определения логических переменных;
- условные формулы и уравнения;
- описания выхода переменных на ограничения;
- описания переменных с конечным числом состояний и непрерывным входом (“непрерывных автоматов”)

Кроме того, в математическое описание могут входить операции “чистого” и “транспортного” запаздывания по времени.

Для того чтобы ввести математическое описание объекта в ЭВМ, его нужно записать на входном для системы САМСОН языке МИФ (Математика И Физика). Форма записи и ввода в ЭВМ исходного математического описания на языке МИФ практически совпадает с традиционной математической записью. Важно отметить, что исходное математическое описание не требуется “препарировать”, т.е. приводить к какому-либо каноническому виду. Системы дифференциальных и/или алгебраических уравнений допустимо записывать в виде, неразрешенном относительно производных и переменных. Порядок расположения уравнений в тексте на МИФе не играет роли. Таким образом, система САМСОН воспринимает и обрабатывает систему уравнений следующего общего вида:

$$f(\dot{x}, x, \tau) = 0.$$

При этом допускаются топологически вырожденные системы уравнений (т.е. такие, для которых матрица $\frac{\partial f}{\partial \dot{x}}$ является прямоугольной).

Для того чтобы система САМСОН сгенерировала программу, необходимо кроме математического описания ввести в систему запрос на генерацию программы. Запрос формулируется также на языке МИФ и состоит из описания постановки задачи, указаний о численных методах (необязательных) и задания исходных данных.

Описание постановки задачи на МИФе состоит из указания списков входных и выходных переменных — “что дано” и “что надо вычислить”. По этой информации САМСОН автоматически строит вычислительную схему алгоритма решения задачи. Отметим, что от пользователя не требуется при этом никаких указаний о том, какую переменную из какого уравнения следует вычислять (или какие группы переменных из каких систем уравнений), о порядке следования вычислений, об организации условных операторов и т.п. Всю необходимую для этого информацию система САМСОН извлекает из математического описания сама, путем анализа топологии задачи и выявления информационных связей между переменными.

Полученная системой САМСОН вычислительная схема, или план вычислений, представляет собой информацию о том, какие переменные (или их производные) из каких уравнений — более общо, какие группы переменных из каких множеств уравнений (такие множества, или подсистемы уравнений, называются блоками) — и в каком порядке следует вычис-

лять. Заметим, что план вычислений определяется однозначно, с точностью до перестановки блоков, информационно не зависящих друг от друга.

Приведем небольшой пример. На рисунке изображена расчетная схема некоего объекта моделирования. Пусть математическое описание этого объекта имеет вид

$$V \cdot \frac{dy}{d\tau} = G_1 - G_2; \quad (1)$$

$$V \cdot \frac{d(\gamma i)}{d\tau} = i_1 G_1 - i_2 G_2; \quad (2)$$

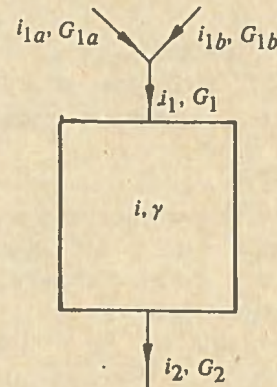
$$G_1 = G_{1a} + G_{1b}; \quad (3)$$

$$\gamma = f(i); \quad (4)$$

$$i = \frac{i_1 + i_2}{2}; \quad (5)$$

$$i_1 G_1 = i_{1a} G_{1a} + i_{1b} G_{1b}. \quad (6)$$

Пусть i_{1a} , G_{1a} , i_{1b} , G_{1b} заданы (как функции от τ). Требуется найти i , γ , i_2 , G_2 (как функции от τ).



Расчетная схема объекта моделирования

Для данной задачи САМСОН построит следующий план вычислений:

- 1) вычислить γ из 4-го уравнения;
- 2) вычислить G_1 из 3-го уравнения;
- 3) вычислить i_1 из 6-го уравнения;
- 4) вычислить i_2 из 5-го уравнения;
- 5) вычислить $\frac{dy}{d\tau} \frac{di}{d\tau} G_2$ из системы уравнений (1), (2), (4).

Здесь (4) — это уравнение, которое САМСОН продифференцирует в символьном виде по времени:

$$\frac{dy}{d\tau} = \frac{\partial f}{\partial i} \cdot \frac{di}{d\tau}.$$

План вычислений представляет собой основу, используя которую САМСОН будет далее генерировать результирующую программу. Для этого САМСОН производит над блоками плана аналитические вычисления — разрешение уравнений или их систем относительно указанных в плане переменных или групп

переменных. Так, для данной задачи САМСОН построит следующую последовательность расчетных формул:

$$\begin{aligned} \gamma &= f(i); \\ G_1 &= G_{1a} + G_{1b}; \\ i_1 &= (i_{1a}G_{1a} + i_{1b}G_{1b})/G_1; \\ i_2 &= 2i - i_1; \\ \frac{di}{d\tau} &= (i_2 - i_1)G_1 / (V((i_2 - i_1) \frac{\partial \gamma}{\partial i} - \gamma)); \\ \frac{d\gamma}{d\tau} &= \frac{\partial \gamma}{\partial i} \cdot \frac{di}{d\tau}; \\ G_2 &= G_1 - V \frac{d\gamma}{d\tau}. \end{aligned}$$

Частная производная $\frac{\partial \gamma}{\partial i}$, появившаяся в результате дифференцирования 4-го уравнения, будет заменена конечно-разностным выражением

$$\frac{\partial \gamma}{\partial i} \approx [f(i + \Delta i) - f(i)] / \Delta i.$$

На основе полученной последовательности расчетных формул САМСОН сформирует программу расчета "правых частей" — для вычисления величин γ , i_2 , G_2 и производной $\frac{di}{d\tau}$.

Аналитическое разрешение может оказаться невозможным или нецелесообразным (например, в случае систем уравнений высокого порядка). В такой ситуации пользователь может задать в запросе на генерацию программы указания о численных методах, которыми следует решать те или иные уравнения или системы уравнений. Кроме того, пользователь может также выбрать метод для численного интегрирования дифференциальных уравнений.

В системе САМСОН имеется библиотека программ, реализующих численные методы решения нелинейных алгебраических (трансцендентных) уравнений, линейных и нелинейных систем уравнений, интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений, а также программ, реализующих чистое и транспортное запаздывание, релейные характеристики, и программ поддержки выполнения. По указанию пользователя о численном методе генерируется обращение к соответствующей численной подпрограмме.

Для некоторых численных методов (например, для метода Ньютона решения нелинейных уравнений или систем уравнений) требуется якобиан. САМСОН генерирует в таких случаях также и подпрограмму вычисления якобиана. Частные производные формируются при этом в символьном виде.

Некоторые численные методы, например метод итераций по Зейделю, не имеют соответствующей численной подпрограммы. Для таких методов САМСОН непосредственно формирует итерационные циклы (могущие быть и вложенными). Информацией о "разрыве" контуров должны при этом служить указания пользователя.

Для того чтобы можно было окончательно сгенерировать программу, САМСОНу необходимо задать исходные данные. Под ними понимается следующая информация: шаг счета, условие окончания счета, начальные данные, значения параметров, список печатаемых или выводимых на график переменных, формат и шаг вывода, формулы для вычисления входных переменных и др. Вся эта информация задается на языке МИФ в разделе задания исходных данных. Здесь же пользователь может указать вид генерируемой программной единицы — программа, подпрограмма, подпрограмма-функция. Для некоторых наборов величин пользователь может задать указания о группировке их в именованные COMMON-блоки. Последние две возможности обеспечивают модульность при разработке больших моделей, а также сопрягаемость с программами, написанными на Фортране.

В общем случае запрос на МИФе состоит из четырех частей:

- описание модели;
- описание задачи;
- указание о методах решения;
- задание исходных данных.

Разбиение на такие разделы позволяет не повторять обработку предыдущих разделов при внесении изменений в какой-либо раздел и вообще разнести обработку разделов во времени. Информация — результат обработки раздела — запоминается системой САМСОН на диске. Так, можно для одного и того же описания модели поставить разные задачи, отличающиеся наборами входных и выходных переменных (при этом могут получиться совершенно разные планы вычислений). Можно для одной и той же задачи на модели менять методы решения, не повторяя этап планирования и т.д. Запишем для иллюстрации вышеприведенный пример на языке МИФ с учетом следующих исходных данных:

$i_{1a} = 220$; $i_{1b} = 50$; $G_{1a} = 7 - e^{-0,5\tau}$; $G_{1b} = 4$;
 $i(\tau = 0) = 150$; шаг интегрирования = 0,05; шаг печати = 1, условие окончания процесса — $\tau \geq 60$.

model EXAMPLE;

```
time tau;
V * d.gam = G1 - G2;
V * d.(gam * i) = i1 * G1 - i2 * G2;
G1 = G1a + G1b;
gam = FGAM (i);
i = (i1 + i2)/2;
i1 * G1 = i1a * G1a + i1b * G1b;
param V;
end
```

problem P /EXAMPLE/;

```
input i1a, G1a, i1b, G1b;
output gam, i, i2, G2;
initial i;
end
```

simulate S /EXAMPLE, P/;

```
hint 0,05; param V = 0.3;
input ila = 220, ilb = 50,
      G1a = 7 - EXP (- 0.5 * tau), G1b = 4;
initdata i = 150;
print gam, i, i2, G2 : 1.0;
terminate tau >= 60;
```

end

Система САМСОН осуществляет точный контроль описания модели и задачи на непротиворечивость и полноту. Непротиворечивость описания модели включает в себя, в частности, отсутствие в системе уравнений модели переопределенных подсистем. Так, например, система уравнений вида

$$\begin{aligned}f_1(y_2, y_5) &= 0; \\f_2(y_3, y_4, y_5) &= 0; \\f_3(y_5) &= 0; \\f_4(y_1, y_2, y_4) &= 0; \\f_5(y_2, y_5) &= 0\end{aligned}$$

не является непротиворечивой, т.к. содержит переопределенную подсистему

$$\begin{aligned}f_1(y_2, y_5) &= 0; \\f_3(y_5) &= 0; \\f_5(y_2, y_5) &= 0,\end{aligned}$$

в которой 3 уравнения и 2 неизвестных, хотя формально общее число уравнений в системе равно общему числу неизвестных.

При постановке задачи — указании списков входных переменных — в непротиворечивой исходной модели могут появиться переопределенные подсистемы уравнений. Поэтому САМСОН повторно проверяет на непротиворечивость также и задачу. Задача, поставленная на модели, может оказаться неразрешимой. Это происходит, в частности, в тех случаях, когда пользователь забывает объявить ту или иную переменную входной или забывает написать какое-либо уравнение. В этой ситуации возникает недоопределенность системы уравнений.

САМСОН обрабатывает также и топологически вырожденные системы уравнений. В этом случае производится также проверка поставленной на модели задачи на непротиворечивость и полноту по начальным данным.

Анализ топологии модели и задачи на непротиворечивость и полноту дает большой выигрыш по времени, т.к. позволяет обнаруживать ошибки “высокого уровня” в математических описаниях на ранних стадиях работы с этими описаниями.

Основу “интеллекта” системы САМСОН образуют математические алгоритмы теории графов и компьютерной алгебры. Анализ топологии модели и задачи, а также планирование — построение плана вычислений — САМСОН производит, используя графо-

вое представление модели, так называемый терм-граф, который содержит информацию о вхождениях переменных и их производных в уравнения. Ядро блока планирования решения задачи в системе САМСОН образуют, как и в системах работ [1—3], алгоритм построения максимального паросочетания в двудольном графе (“венгерский метод”) и алгоритм разбиения ориентированного графа на сильно-связные компоненты (у нас — алгоритм Р. Тарьяна). Кроме этого, применяются алгоритмы обработки топологически вырожденных систем уравнений, разработанные одним из авторов.

Механизм планирования в системе САМСОН существенно сложнее, чем в [1—3], из-за наличия в языке МИФ специфических конструкций (ограничители, дискретные переменные и др.), необходимых для реального моделирования, а также из-за обработки топологически вырожденных систем уравнений.

Суммарная вычислительная сложность алгоритмов планирования — $O(p q \log q)$, где p — число ребер; q — число вершин терм-графа модели.

Для проведения аналитических выкладок в системе САМСОН реализованы алгоритмы компьютерной алгебры, выполняющие операции с многочленами и рациональными функциями от нескольких переменных с целыми коэффициентами, включая нахождение наибольшего общего делителя, а также арифметические операции над произвольными формулами, дифференцирование формул, упрощение формул, смешанные вычисления формул, факторизацию многочленов, символьное решение уравнений и систем уравнений.

Система САМСОН проходит опытную эксплуатацию с 1987 г. (первоначальный вариант — на БЭСМ-6, с середины 1990 г. — на персональной ЭВМ IBM PC).

Заключение. Авторами была осуществлена реализация на МИФе моделей оборудования и систем ЯЭУ, уже имеющих программные аналоги в составе исследовательского тренажера ЯЭУ (что проводилось как для получения легко модернизируемой версии моделей, так и с методической целью — сопоставления эффективности технологий моделирования), а также разработка и реализация ряда новых математических моделей. Объектами моделирования являлись такие элементы ЯЭУ, как парогенератор, паротурбинная установка, конденсатно-питательная система, система охлаждения и др.

Объем математического описания каждой из моделей составляет до 300 уравнений и соотношений; время генерации программ модели не превышает 1—2 минут на ЭВМ IBM PC с процессором 80286. Сгенерированные программы для каждой модели имеют объем порядка 1000 операторов Фортрана, объем и быстроедействие программ уступают аналогичным характеристикам программ, полученным по традиционной технологии не более чем на 20—30%.

Система САМСОН имеет “дружественный” интерфейс, выполненный в виде интегрированной среды (“турбо”) с встроенным редактором, отладчиком моделей, службой “HELP”, графической подсистемой и др.

В практике моделирования динамики ЯЭУ сложилась ситуация, когда для некоторых видов физических процессов (скажем, двухфазные течения) нет пока еще установившихся математических описаний и методическая работа по выбору адекватного описания еще далека от завершения. При создании тренажеров и систем управления в контуре с ЭВМ важное значение имеет простота описания в связи с жесткими ограничениями на время работы моделирующих программ. Далее, при создании принципиально новых видов ядерно-энергетической техники может понадобиться моделирование новых физических процессов. Все это говорит о том, что системы, "понимающие" и решающие уравнения, не утратят своего значения и в будущем. Это обусловлено также их универсальностью (нет привязки к физической сущности решаемых задач), переносимостью генерируемых программ, возможностью адаптации к вычислительной технике нетрадиционного типа (векторные ЭВМ, транспьютеры, потоковые ЭВМ). Перспективна, на наш взгляд, работа по созданию на базе системы САМСОН специализированных моделирующих пакетов с входными языками,

ориентированными на конечного пользователя — конструктора, технолога, расчетчика-исследователя и т.д.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Попырин Л.С., Самусев В.И., Эпельштейн В.В. Автоматизация математического моделирования теплоэнергетических установок. М.: Наука, 1981.
2. Elmquist H. Manipulation of continuous models based on equations to assignments statements//Simulation of Systems. Proc. of IMACS Congr. Sorrento. 1979. P. 15—21.
3. Jajima K., Tsunekawa J. Graphical techniques used for dynamic chemical process simulation//Lect. Notes in Control and Inf. Sci. 1982. Vol. 38. P. 826—833.

Статья поступила в редакцию
25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер.
Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 78—82.

УДК 681.3.06:621.311

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ (НА ПРИМЕРЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГБЛОКА АЭС)

А.П. Иванов, Т.Б. Сизова, Н.Д. Михейкина, Г.А. Санковский, А.Н. Тюфягин

Излагаются результаты использования разработанных в ЦНИИКА методических и программных средств автоматизации создания моделей сложных по структуре объектов управления.

AUTOMATION OF PROGRAM MODEL DEVELOPING FOR COMPLEX STRUCTURE CONTROL OBJECTS (USING AN EXAMPLE OF NONLINEAR DYNAMIC MODEL OF NPP POWER UNIT). A.P. IVANOV, T.B. SIZOVA, N.D. MIKHEIKINA, G.A. SANKOVSKY, A.N. TYUFYAGIN. Results of using TSNIKA-developed methodical and program means to computerize the creation of complex structure control object models are suggested.

При автоматизации разработки моделей объектов управления целесообразно опираться на декомпозицию и соответственно на модульный принцип формирования модели. Он позволяет помимо других преимуществ использовать в виде библиотек модулей накопленный опыт. Разработка модели из модулей представляет собой достаточно сложную нетривиальную задачу. Использование для этих целей универсальных языков программирования делает эту задачу весьма трудоемкой, особенно в случае разработки модели объекта большой размерности и сложной структуры.

К интерпретирующей системе, обеспечивающей автоматизацию разработки модели таких объектов, предъявляются следующие требования:

1) обеспечение возможности развития и модификации формируемой модели;

2) удобство формирования структурного описания объекта аналогично его физической структуре;

3) реализация объектов переменной структуры;

4) использование при формировании модели программных модулей пользователя;

5) сервис формирования отладочной печати, печати результирующих таблиц и графиков;

6) возможность реализации остановов, возвратов и продолжений моделирования в любое удобное для пользователя время;

7) диагностика правильности описания модели на языке системы;

8) сбор статистической информации о реализуемых в модели итерационных циклах;

9) формирование заданного количества состояний выходных параметров модулей;

10) представление справочной информации о находящихся в системе моделируемых задачах (описании, данных, результатах).

Этим требованиям удовлетворяет разработанная в ЦНИИКА система ДИСАМ [1]. Опыт ее эксплуатации при моделировании нормальных и аварийных режимов работы энергоблоков АЭС [2, 3], моделировании криогенных установок и др. показал ее высокие пользовательские свойства.

В ЦНИИКА для реализации динамических моделей теплотехнических объектов разработана библиотека программных модулей [4]. В ней реализованы методические разработки и результаты исследований, выполненных в [5]. К разработанным программным модулям предъявлялись следующие требования:

- 1) простота адаптации модели к конкретной входной информации;
- 2) возможность использования модели элемента для сборки модели сложного объекта;
- 3) приемлемое для задач моделирования объекта в целом время вычислительного процесса;
- 4) обеспечение точности в широком диапазоне изменения параметров при большой скорости изменения возмущающих воздействий.

Библиотека программных модулей включает модуль расчета поля температур в теплообменнике с непрерывными замыкающими соотношениями; модуль расчета поля температур в теплообменнике с разрывами в зависимостях для термодинамических свойств и коэффициентов теплоотдачи (вариант со сглаживанием границ и вариант с определением границ); модуль расчета поля температур в трубопроводе; подсистему гидродинамического расчета, включающую модуль расчета давлений и расходов в непрерывной гидравлической цепочке, модуль расчета давлений и расходов в схеме с ветвлениями, модули регуляторов, воздействующие на управляемые элементы в гидравлической схеме; модули автономных регуляторов с П, ПИ, ПИД и т.п. законами регулирования с учетом нечувствительности, гистерезиса; модуль, формирующий режимы управления моделируемыми установками по алгоритму таблицы решений; подсистему расчета таблиц коэффициентов уравнений динамики теплообменников с пароводяным теплоносителем, натрием, воздухом, гелием с коэффициентами теплоотдачи по Нормативным документам в энергетике и по Нормативным документам в криогенной технике и другие частные модули, например модули позонного расчета топки котла, теплового расчета котла, модули определения термодинамических свойств дымовых газов при сжигании органических топлив (газ, мазут, уголь любого типа и состава); подсистему для решения систем линейных алгебраических уравнений со слабо заполненной матрицей; подсистему моделирования динамики процессов в парогенераторе по линеаризованной модели частотным методом и т.д.

Однако при разработке моделей никакая библиотека не может считаться исчерпывающе полной. При создании новых моделей требуется, как правило, разработка новых дополнительных модулей. Наибольшие

трудности вызывает разработка программ для решения жестких систем дифференциальных уравнений, систем уравнений в частных производных. Опыт использования разработанных в [6] методов и алгоритмов для решения таких задач показал их эффективность и адаптируемость к задачам широкого класса. Поэтому было решено на базе этих методов разработать систему генерации программных модулей, решающих системы одномерных уравнений в частных производных конечно-разностными методами.

Система преобразует математическое описание модели на физическом уровне в вычислительную модель и по ней генерирует программный модуль на Фортране.

Система предназначена для автоматизации разработки программного модуля решения статических и динамических задач с учетом использования его при моделировании объектов, представленных сложной схемой взаимосвязанных элементов. Заданием на генерацию является математическое описание в виде системы уравнений в частных производных, обыкновенных дифференциальных уравнений и алгебраических уравнений. Кроме того, должны быть заданы замыкающие соотношения (коэффициенты уравнений) и указан метод решения (выбран из набора реализованных в пакете).

Объектом моделирования могут быть элементы ядерных и тепловых энергетических установок, химические реакторы и т.д. Существенно, что рассматриваются системы уравнений, характерные для описания работы элемента в схеме, т.е. достаточно приближенные, одномерные по пространству, но, с другой стороны, предполагается, что отдельный элемент, для которого производится генерация программного модуля, описывающего функционирование, может иметь "сильные" связи с другими элементами моделируемой установки.

Примеры уравнений в частных производных, которые могут входить в систему: уравнения энергии, уравнения теплопроводности, движения, неразрывности, нейтронной кинетики, концентраций реагентов, диффузий.

Обыкновенные дифференциальные уравнения: точечные уравнения энергии, теплопроводности и т.д., регуляторы, краевые условия. Алгебраические уравнения: статическое приближение уравнений энергии, теплопроводности и т.д., регуляторы, краевые условия, некоторые замыкающие соотношения (имеются в виду те замыкающие соотношения, которые вводятся в систему как алгебраические уравнения для улучшения сходимости итерационных процессов).

Примеры аппаратов: теплообменник типа труба в трубе, трубопровод, прямоточный парогенератор, ядерные реакторы, химические реакторы с прямоточным и противоточным движением реагентов.

Математическое описание теплопереноса в теплообменнике (основном элементе теплотехнических установок) с точки зрения пространственной распределенности и скорости протекания процессов распадается на две подсистемы. Первая описывает поле

температур и лимитирует шаг по пространству, вторая описывает изменение давления и скорости движения среды и лимитирует шаг по времени. Вычислительные алгоритмы и рекомендации по выбору шага дискретизации по пространству в зависимости от требуемой точности и модернизированного критерия Стентона приведены в [3, 5, 7].

Автоматизация формирования модели гидравлической схемы и ее моделирование осуществляются с помощью подсистемы расчета процессов гидродинамики в схемах разветвленной структуры. Моделируется работа включаемых в схему элементов оборудования (сопротивлений — клапанов, вентилях; емкостей с сопротивлением на входе и выходе — теплообменников, трубопроводов; насосов; компрессоров; регуляторов, управляющих положением клапанов).

Входной язык системы: диалоговый язык управления; графический ввод с дисплея расчетной схемы; табличный ввод числовой информации; табличный ввод алгоритма управления работой схемы; табличный ввод описания формируемых таблиц результирующей информации. Предусмотрены средства коррекции графического изображения схемы и соответствующих табличных данных. Измененные или вновь внесенные в схему элементы в автоматически формируемых таблицах, подлежащих заполнению пользователем, отмечаются вопросами.

Представленные инструментальные средства использовались для автоматизации разработки моделей с замкнутой САУ энергоблоков АЭС, энергоблоков на органическом топливе, криогенных установок, микроклимата климатических камер и медицинских барокамер.

Этапы моделирования. Подразделяются на

- вспомогательные, связанные с подготовкой и проведением моделирования на ЭВМ;
- подготовительные, связанные с изучением объ-

екта и его декомпозицией, разработкой новых модулей, в том числе и с применением генератора;

— собственно моделирование, разделяющегося на разработку модели; описание модели на входном языке системы; отладку с использованием сервисных возможностей системы; проведение моделирования исследуемых режимов работы блока и формирование выходных документов (таблиц и графиков процессов, описания модели на входном языке системы) по данным, накопленным в архиве системы.

Автоматизация этапов различна, имеются этапы, не поддерживаемые инструментальными средствами.

Вспомогательные этапы обеспечиваются средствами MS DOS, стандартных редакторов, системой ДИСАМ и включают следующие работы:

- проверка наличия системы ДИСАМ в виде загрузочных модулей на рабочем диске ЭВМ;
- включение в эту библиотеку необходимых модулей для решения задачи, в том числе и “переходников”, сгенерированных системой для подключения модулей задачи к интерпретирующей системе;
- изучение инструкции пользователя ДИСАМ;
- проверка каталога задач в системе ДИСАМ с помощью запуска КАТАЛОГа для того, чтобы назвать свою задачу именем, отличным от имеющихся в каталоге;
- проверка состояния задачи с помощью справочной подсистемы в соответствии с инструкцией пользователя ДИСАМ.

Подготовительные этапы поддерживаются теми же средствами, что и вспомогательные, и включают следующие работы:

- разработка расчетной схемы моделируемой установки на основании ее структурной схемы (рис. 1) с учетом принятой разбивки на элементы с указанием информационных связей между элементами (для удобства работы с информацией целесообразно при-

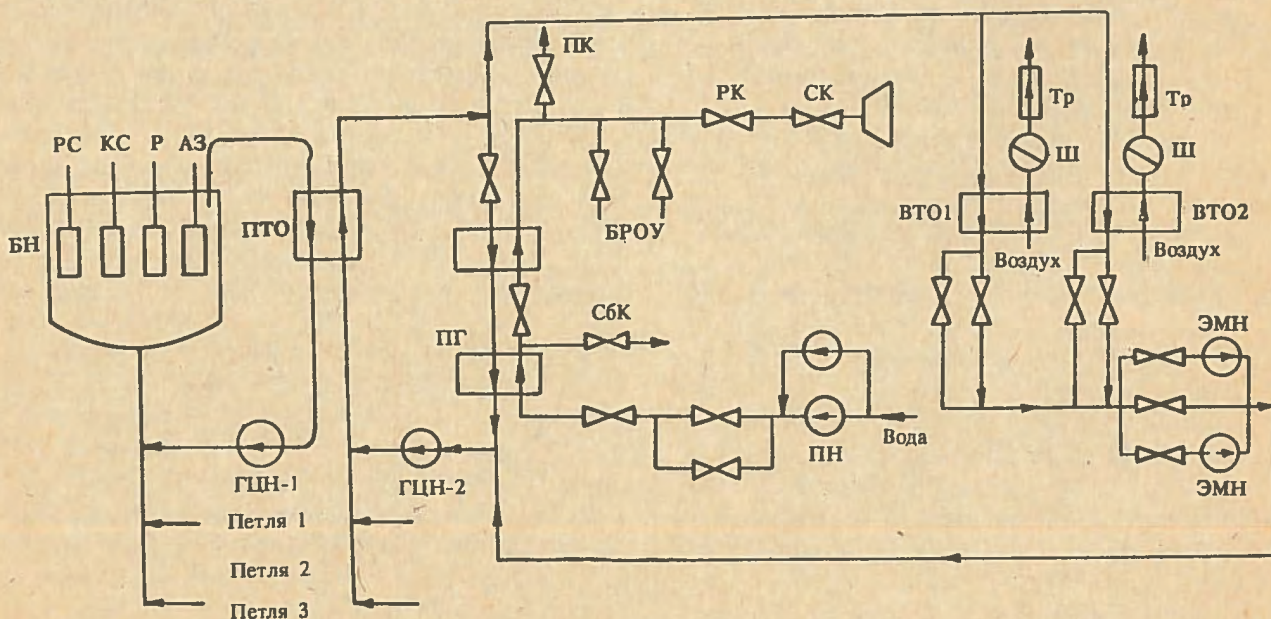


Рис. 1. Структурная схема энергоблока: РС — регулирующие стержни; КС — компенсирующие стержни; Р — компенсирующая решетка; АЗ — аварийная защита; ПТО — промежуточный теплообменник; ГЦН — главный циркуляционный насос; ПГ — парогенератор; СБК — сброс конденсатора; ПК — предохранительный клапан; БРОУ — быстродействующая редуцирующая установка; РК — регулирующий клапан; СК — стопорный клапан; ПН — питательный насос; ВТО — воздушный теплообменник; Ш — шибер; Тр — труба; ЭМН — электромагнитный насос

своеение сокращенных имен-идентификаторов элементам с учетом мнемоники; например ТН1П1: здесь Т — трубопровод, Н — натриевый, 1П — первой петли, 1 — порядковый номер 1; ПП1П2 — ПП — пароперегреватель, 1П — первой петли, 2 — порядковый номер 2);

— выбор из каталога программных модулей для расчета элементов схемы;

— разработка недостающих программных модулей вручную или с использованием генератора программных модулей (этапы работы с генератором и его описание приведено в [8]);

— формирование таблицы соответствий имен программных модулей идентификаторам расчетной схемы;

— подготовка исходных данных, диалогово-табличный ввод данных и расчет по ним многопараметрических таблиц коэффициентов уравнений динами-

ки; в табличной форме могут быть представлены и другие характеристики (например, характеристики регулирующих клапанов), параметры по которым при моделировании будут определяться интерполяцией.

Собственно моделирование поддерживается системой ДИСАМ при выполнении всех работ:

— разработка модели опирается на аналоги моделей в архиве системы, алгоритм модели энергоблока АЭС (структурную схему которого см. на рис. 1) приведен на рис. 2а, б;

— описание модели осуществляется на входном языке системы, реализующем структурный принцип программирования; входной язык содержит разделы.

Описание начинается с раздела ПАСПОРТА, где декларируются модули, нужные для интерпретации, и типы файлов, с которыми они будут работать.

В разделе СОСТАВ перечисляется, какие элементы схемы какими модулями будут моделироваться. Каждому модулю и связанному с ним файлу сопоставляется элемент схемы моделируемой установки. Состояние такого объекта изменяется при активации (обращении) к соответствующему модулю.

Раздел ЗАДАЧИ содержит описание последовательности активизации элементов расчетной схемы. Выполнение задач может обуславливаться условием. Для описания последовательности активизации исполь-

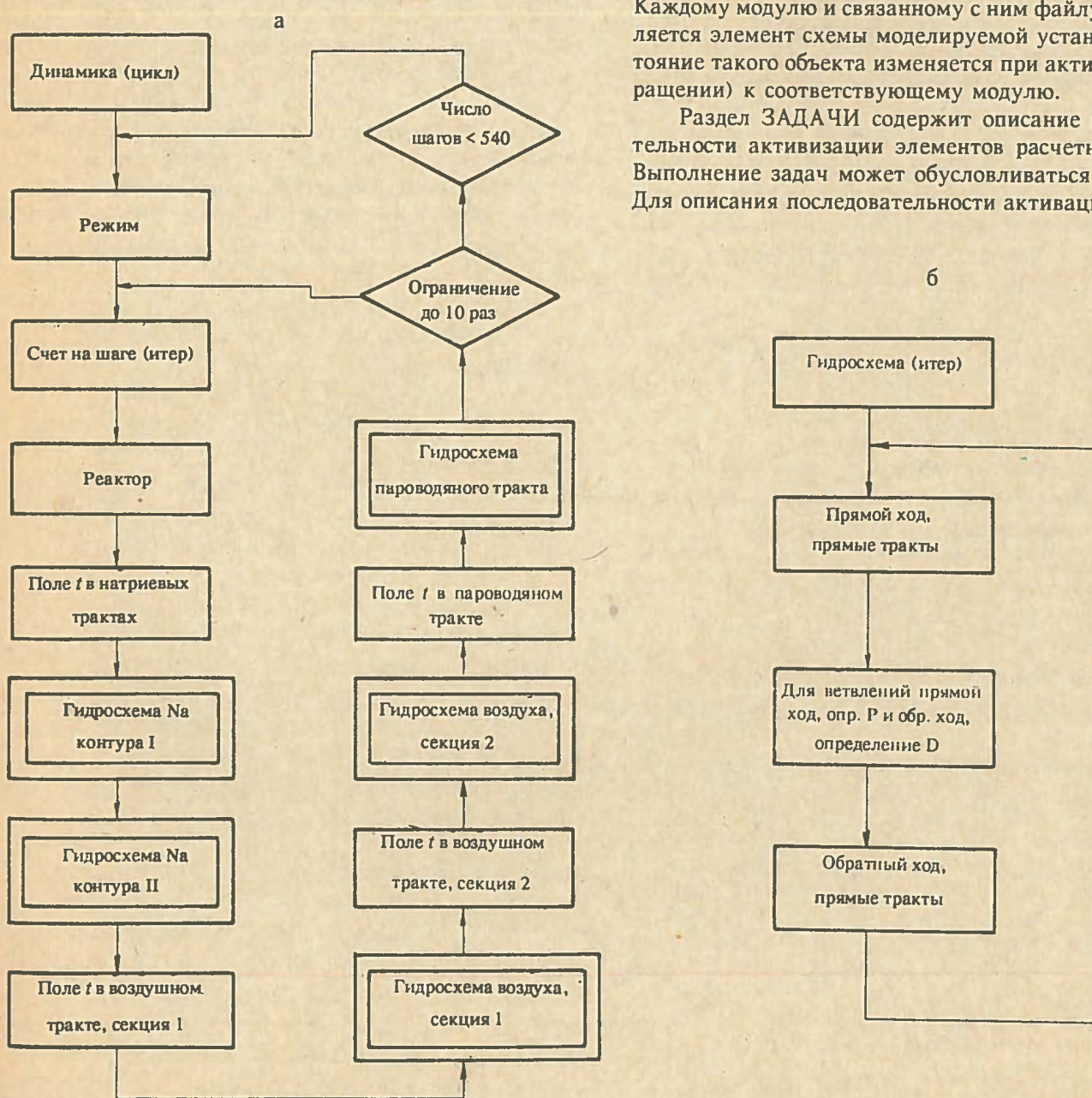


Рис. 2. Схема алгоритма расчета: а — обобщенный вариант; б — уточнение

зуются следующие макрооперации: линейный блок, переключатель (выбор), цикл (цикл "до"), итерационный цикл (цикл "пока"). Структура программы активации развертывается в виде ациклического графа из вложенных одна в другую подзадач. На концах — всегда элементы. Пример графа активации приведен на рис. 3. Для обозначения любого такта работы программы требуется предложение, состоящее не более чем из $2n$ слов, где n — количество подзадач. Можно построить оператор, описывающий сразу определенную группу тактов. Это используется для локализации и индикации отладочных операций, для задания моментов реализации обмена информацией между элементами, для автоматического построения и изменения иерархической, последовательной базы данных результатов.

Раздел СВЯЗИ содержит описание операций обмена информацией между элементами. Осуществляется передача адреса параметра или пересылка, выборка из массива. Имеются списочные операторы, позволяющие в свернутом виде описать связи в группах элементов. Предусмотрено описание передачи информации по условию.

Раздел АРХИВ содержит перечень параметров, предназначенных для формирования выходных документов — таблиц и графиков, которые формируются автоматически по заданию пользователя в разделе ПЕ-

ЧАТЬ. Оператор содержит список максимально из пяти параметров, из которых первый параметр — абсцисса (ограничение — пять параметров — вызвано размером экрана дисплея РС, на ЕС ЭВМ ограничение — девять параметров — обусловлено еще и тем, что график печатается порядковым номером параметра в операторе задания печати).

Раздел ДАННЫЕ содержит значения параметров, являющиеся исходными данными. Предусмотрен оператор с параметром, который является признаком присваивания одного и того же значения перечисленному списку идентификаторов. Особенно удобно воспользоваться им при задании данных для трех симметричных петель энергоблока. Помимо сокращения записи это обеспечивает и уменьшение ошибок.

Раздел УПРАВЛЕНИЯ содержит формализованное описание условий управления процессом расчета посредством задания контрольных точек остановов (паузы) и контрольных точек для возврата, в которых осуществляется запоминание состояния программы. В паузе можно снять задачу, скорректировать ее и далее или продолжить ее, или вернуться на одну из контрольных точек возврата, или начать исполнение сначала. Продолжение можно отложить и на неопределенный срок. Структура базы данных результатов такова, что не требуется какой-либо перестройки при

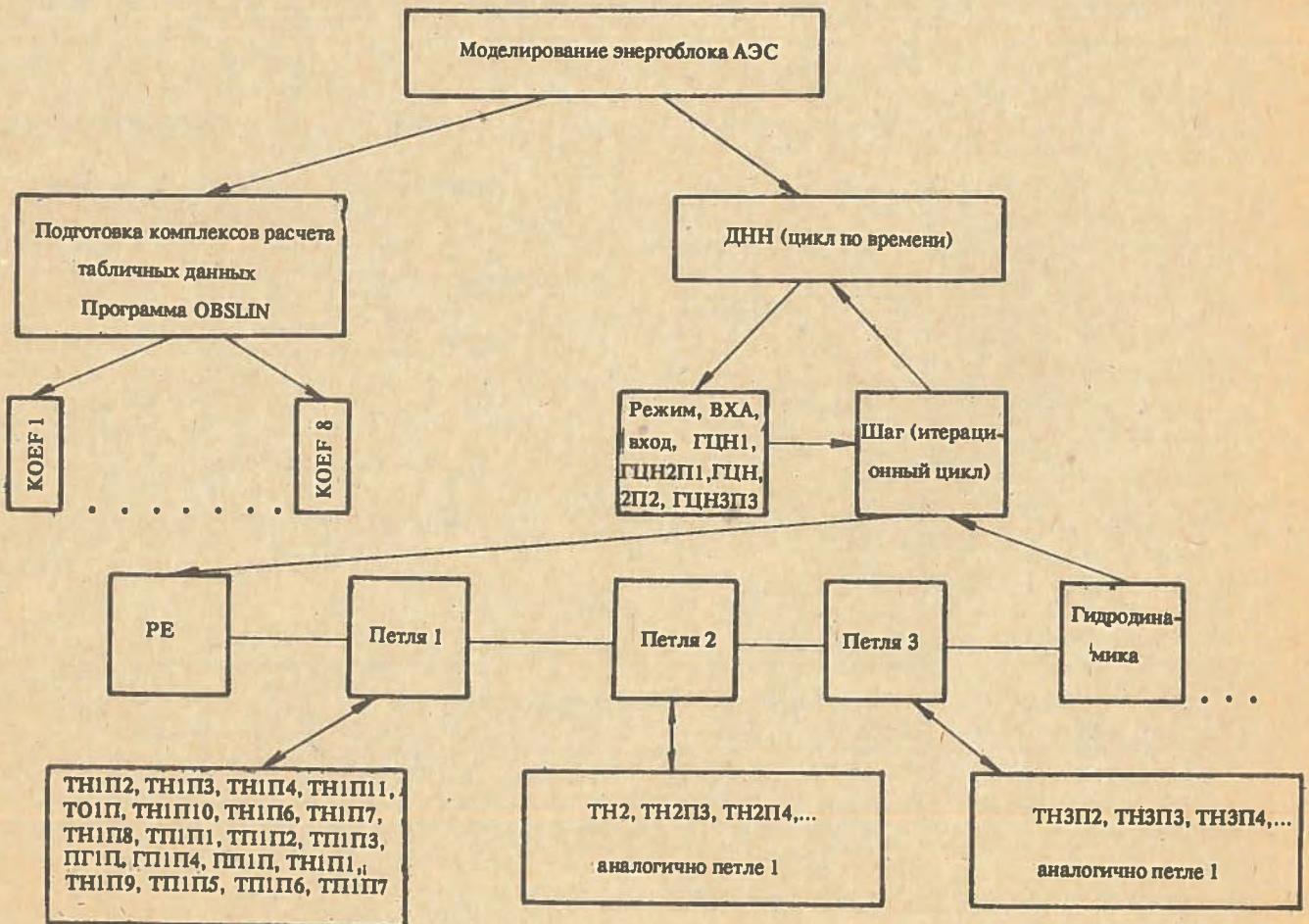


Рис. 3. Схема алгоритма моделирования, граф активации

возврате на контрольную точку и (или) изменении задачи. Подробное описание входного языка ДИСАМ и пример его использования приведены в [1]; язык содержит следующие разделы:

- трансляция описания задачи с входного языка; она осуществляет еще и контроль соответствий описаний, контроль синтаксических ошибок, ошибок в именах элементов, задач, параметров, выдавая соответствующие сообщения пользователю; задача формируется не одновременно, и именно этап трансляции используется для отладки модели на уровне ее описания;

- счет с выводом информации, доступной интерпретирующей программе (трассировка задачи, печать параметров, являющихся входами, выходами модулей), печать информации вычислений внутри модулей по признакам, предусмотренным разработчиками модулей; на этом этапе выявляются ошибки в описании последовательности расчета, связях между элементами, исходных данных посредством визуального контроля промежуточной информации, статистики по итерационным процессам, аварийным остановам;

- расчет исходного стационарного состояния (для динамических задач); анализ информации после выхода на статику осуществляется традиционным ручным методом посредством проверки материального и энергетического балансов, сравнения с результатами, полученными по другим моделям, другими методами; эти сравнения могут быть формализованы и включены в вычислительную модель по желанию пользователя; на этом этапе выявляются и устраняются ошибки, пропущенные на предыдущих этапах;

- расчет переходных процессов с выводом важнейших параметров по ходу счета; по визуальному контролю и аварийным остановам выявляются ошибки в параметрах, характеризующих динамические свойства объекта моделирования; с использованием аппарата коррекции ошибки устраняются пользователем;

- массовые расчеты; автоматически выдаются выходные документы (по заданию пользователя), содержащие таблицы и графики изменения значений важнейших параметров объекта моделирования из заполняемого во время счета архива системы; выдача результатов может осуществляться в любое удобное для пользователя время; при смене режима и последующего расчета сначала следует иметь в виду, что сохранять архив предыдущего режима нужно средствами MS DOS.

Характеристика модели энергоблока АЭС. Теплообменное оборудование описывается системами уравнений в частных производных и обыкновенных дифференциальных уравнений. После преобразования получается система дифференциальных уравнений. Жесткость системы не позволяет эффективно решать ее явными методами. При применении неявных мето-

дов приходится решать систему алгебраических уравнений. Однако система состоит из слабо связанных квазидиагональных подсистем, что и используется в нашем случае при решении.

Число операций при реализации одного шага по времени неявного метода по сравнению с явным увеличивается примерно в два раза, алгоритм существенно усложняется. Но, с другой стороны, при этом шаг по времени можно увеличить в 10—1000 раз по сравнению с явными методами, что дает существенный выигрыш.

Алгоритм решения общей системы разностных уравнений (см. рис. 2) следующий: решение подсистемы, описывающей поля температур при заданных давлениях и расходах; определение температур (энтальпий) и производных температуры (энтальпии) по расходу; решение подсистемы, описывающей поле давлений, расходов, при этом значение производной энтальпии по расходу учитывает сильную связь подсистемы гидродинамики с подсистемой, описывающей поле температур.

Система, описывающая поле температур, решается методом Гаусса при условии, что схема простая, например противоток, когда рационально можно реализовать метод прогонки. Однако и сложную систему можно разбить на ряд простых слабо связанных подсистем (см. рис. 2). Эти подсистемы и подсистемы определения давлений и расходов увязываются итерационно. Ускорение сходимости обеспечивается учетом сильных связей, демпфированием коэффициентов и т.п.

Определение давлений и расходов проводится в два этапа (см. рис. 2,б). Методом прогонки определяются зависимости расхода от давления на входе и выходе участков тракта между ветвлениями. Подставляя эти зависимости в уравнения материального баланса для точек смешения-разделения и исключая расходы, получаем систему уравнений относительно давлений в точках ветвления. Эта система решается методом Гаусса. Далее реализуется обратный ход, определяются расходы в точках ветвления и поле давлений и расходов.

При разработке вычислительной модели энергоблока было принято целесообразным представить задачу в виде системы взаимосвязанных элементов, каждый из которых описывается оператором $\bar{y} = w \bar{x}$, и использовать предварительно подготовленное для каждого элемента многопараметрическое табличное представление коэффициентов уравнений динамики, зависящих от определяемых параметров. Использование таблиц коэффициентов позволяет сократить время счета в 10—100 раз путем уменьшения числа операций, затрачиваемых на определение теплофизических параметров, коэффициентов теплоотдачи, гидравлических сопротивлений, комплексов, являющихся коэффициентами уравнений динамики, унифицировать программное обеспечение.

Данные, характеризующие модель энергоблока

Состав моделируемой системы	Количество элементов	
	Однопетлевая схема	Двухпетлевая схема
Исходная математическая модель:		
— уравнения в частных производных	~ 200	~ 350
— обыкновенные дифференциальные уравнения	~ 40	~ 70
— краевые условия	~ 25	~ 45
— логические условия	~ 70	~ 130
Вычислительная модель:		
— разностные уравнения	~ 900	~ 1600
— таблицы для определения коэффициентов	~ 70	~ 70
— логические условия	~ 70	~ 130
Элементы расчетной схемы	~ 100	~ 200
Элементы гидросхемы:		
— пароводяной тракт	~ 20	
— натрий второго контура	~ 10	
— воздушный тракт	~ 3	

Для реализации программы требуется следующий ресурс:

- тексты модулей модульной базы задачи хранятся в упакованном виде и занимают ~ 0,5 Мбайт;
- база данных занимает ~ 0,6 Мбайт;
- для исполнения модели системой ДИСАМ ~ 0,4 Мбайт;
- время моделирования на ЕС-1055 в 2 + 20 раз превышает время процесса (аналогичные показатели получены на PC AT с процессором INTEL 386).

Результаты моделирования. Разработанная модель использовалась для проверки САУ энергоблоком. Эксплуатация энергоблока включает в себя нормальные режимы — планового перехода с одного уровня мощности на другой и аварийные. Технологически режимы должны вестись таким образом, чтобы отклонения основных технологических параметров, и в частности температур, не превышали допустимых пределов. В этом отношении наиболее важными для моделирования являются аварийные режимы, определяющие в основном безопасность эксплуатации АЭС. Характерной особенностью таких режимов является быстрое снижение мощности энергоблока при появлении аварийного сигнала. Интересны режимы отключения турбогенератора от сети, отключения одной петли, остановки питательного насоса. Аварийные режимы типа “Быстрая аварийная защита”, “Прекращение подачи питательной воды на парогенераторы”, “Обесточивание” и т.д. приводят к полному останову энергоблока с необходимым поддержанием всех технологических параметров в допустимых пределах. Разработанная модель использовалась для моделирования таких режимов, а также отказов элементов в системе регулирования и системе аварийного воздушного охлаждения.

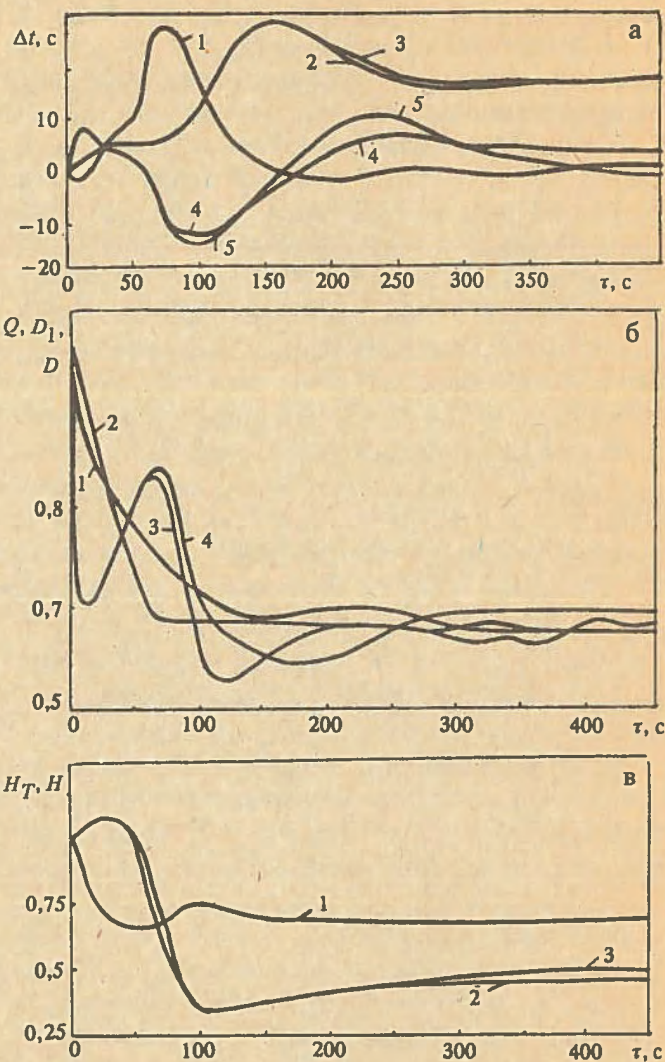


Рис. 4. Изменения параметров энергоблока:

а — температуры теплоносителя на выходе из реактора (1); температуры острого пара на выходе из парогенератора первой (2), а также второй и третьей (3) петли; температуры теплоносителя на выходе парогенератора первой (4), а также второй и третьей (5) петель; б — мощности реактора (1); расхода теплоносителя первого контура (2); расхода питательной воды в первой (3), а также второй и третьей (4) петлях; в — положения клапана турбины (1); положения регулирующего питательного клапана в первой (2), а также второй и третьей (3) петлях

На рис. 4 приводятся примеры полученных графиков изменения параметров в энергоблоке при аварийном отключении одного из двух работающих турбопитательных насосов.

Закключение. Разработанный комплекс инструментальных средств, библиотека программных модулей и методические рекомендации по моделированию замкнутых систем управления энергоблоков АЭС [1, 2, 6, 7] использовались при создании модели энергоблока и обосновании САУ при разработке техпроекта конкретной АСУ энергоблока. Программное обеспечение принято МВК в составе инструментальных и методических материалов, разработанных по комплексной целевой программе ГКНТ, и внедряется через Специализированный фонд алгоритмов и программ.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Диалоговая интерпретирующая система автоматизации моделирования: Руководство пользователя: Ротапринт/ЦНИИКА. М., 1980.
2. Иванов А.П., Сизова Т.Б., Михейкина Н.Д. Применение системы автоматизации моделирования для расчета динамики тепловых процессов в блоке энергетической установки АЭС//Автоматизированное проектирование математического и информационного обеспечения АСУТП. М.: Энергоатомиздат, 1988. С. 11—13.
3. Моделирование динамических процессов в энергоблоке при отказах элементов САУ/Г.А. Санковский, А.Н. Тюфягин и др.//Методы повышения эффективности функционирования АСУ. М.: Энергоатомиздат, 1988. С. 39—41.
4. Библиотека модулей для динамических моделей энергоблоков АЭС: Методические рекомендации: Ротапринт/ЦНИИКА. М., 1988.
5. Иванов А.П. Разработка нелинейных моделей теплоэнергетического оборудования для исследований глубоких возмущающих воздействий: Автореф. дис. канд. техн. наук. М., 1988.
6. Моделирование САУ энергоблоков АЭС: Методические рекомендации: Ротапринт/ЦНИИКА. М., 1989.
7. Погрешность разностных схем расчета динамики противоточных теплообменников/А.П. Иванов, Н.С. Хорьков и др.//Теплоэнергетика. 1983. № 10. С. 72—76.
8. Система генерации программных модулей по математическому описанию в виде систем уравнений в частных производных, обыкновенных дифференциальных уравнений и алгебраических уравнений: Методические рекомендации: Ротапринт/ЦНИИКА. М., 1991.

Статья поступила в редакцию
25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер.
Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 82—89.

УДК 681.03.06

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

А.И. Зинин

Рассматриваются принципы построения, компоненты и функции интегрированной системы для автоматизированного построения математических моделей технологического оборудования АЭС. Описывается способ применения интегрированной системы математического моделирования для разработки тренажерных моделей.

AN INTEGRATED SYSTEM FOR DEVELOPING AND ANALYSING RESEARCH MODELS OF NPP TECHNOLOGICAL EQUIPMENT. A.I. ZININ. Principles of development, components and functions of an integrated system used for computer-aided construction of mathematical models of NPP technological equipment are discussed. A method of applying an integrated system of mathematical modelling for developing simulator models is considered.

Современная система профессиональной подготовки оперативного персонала АЭС предполагает широкое использование технических средств обучения, важнейшими из которых являются тренажеры. Различают понятийные, специализированные и полномасштабные тренажеры. В любом случае "сердцем" тренажера, его важнейшей компонентой, является математическая модель технологического оборудования энергоблока АЭС и его автоматизированной системы управления (АСУ ТП). Тренажерная математическая модель должна обладать следующими свойствами.

1. Моделируются все параметры, которые отображаются на блочном щите управления энергоблока и входят в зону обслуживания оперативного персонала, для которого предназначен тренажер.

2. Моделируются все допустимые управляющие воздействия оперативного персонала в их естественной форме.

3. Модель выполняется на ЭВМ в реальном времени.

4. Погрешности модели лежат в пределах погрешности наблюдательной функции операторов.

Создание тренажерной модели энергоблока АЭС — очень сложная задача. Разработка подходящих методов моделирования немислима без проведения большого количества численных экспериментов на ЭВМ. Для этого применяются исследовательские модели, в качестве которых могут быть использованы готовые программы, разработанные в процессе проектно-исследовательских работ по энергоблоку. Количество таких программ исчисляется сотнями. Однако непосредственное их использование для проектирования тре-

нажерной модели энергоблока затруднено по ряду причин. Это — их узкая специализация; несовместимость ЭВМ, для которых разработаны программы; недостаточная системотехническая проработка; большие затраты машинного времени; отсутствие модели субъекта управления и т.п. В данной работе предлагается другой подход: создание специализированной интегрированной системы, которая позволит автоматизировать разработку исследовательских моделей и процесс исследования тренажерных моделей.

Разработка модели — это итерационный процесс, начинающийся с формулировки модели. Приемлемая тренажерная модель получается за некоторое количество итерационных циклов, в каждом из которых специалистами принимаются компромиссные решения по упрощению сценариев тренировки, либо математического описания оборудования. Заметим, что значительная часть работы, а именно построение адекватной модели, может быть проделана на уровне исследовательских моделей параллельно по времени с созданием технических средств тренажера. Кроме того, возможно широкое использование исследовательских моделей для обоснования принимаемых упрощений.

Рассмотрим возможный эффект внедрения в данную схему разработки тренажерных моделей автоматизированной системы имитационного моделирования. Она позволяет сократить итерационный цикл схемы за счет уменьшения доли ручного труда на стадиях реализации и испытания динамической модели. На входе автоматизированной системы используется специализированный язык высокого уровня, который может быть сделан понятным не только программисту, но и математику и системотехнику. Это решает часть языковой проблемы, т.к. общение с программистами затруднительно даже для математиков. Наконец, автоматизированная система имитационного моделирования позволяет оперативно “проиграть” различные способы декомпозиции объекта на подсистемы и различные способы учета связей между ними, что весьма существенно для рационального выбора схемы интегрирования динамической системы в реальном времени.

Наиболее адекватной формой реализации автоматизированной системы имитационного моделирования представляется на сегодняшний день интегрированная система, позволяющая проводить в единообразной среде проектирование, сборку, исследование имитационных моделей и анализ результатов с использованием графических средств.

Краткая характеристика предметной области системы ПРИМ. Суть математического моделирования заключается в том, что поведение исследуемого объекта описывается набором уравнений, решая которые, получают целостную картину поведения объекта во времени. Предметная область системы ПРИМ — математическое моделирование технологического оборудования и автоматизированной системы управления энергоблока с быстрым реактором типа БН.

Математическая модель, с которой имеет дело система ПРИМ, состоит из системы алгебраических уравнений или обыкновенных дифференциальных

уравнений, системы неравенств и множества логических выражений. В уравнения, неравенства и логические выражения входят переменные двух типов: непрерывные или динамические переменные и переменные-события. Состояние объекта моделирования непрерывно изменяется в соответствии с законом, определенным системой алгебраических и дифференциальных уравнений, до тех пор, пока не наступит какое-либо событие. Каждому неравенству, входящему в математическую модель, ставится в соответствие элементарное событие. Когда левая часть неравенства изменяет знак, соответствующая переменная-событие изменяет свое значение. Сложные события комбинируются из элементарных событий с помощью логических выражений. При возникновении события состояние объекта моделирования изменяется скачком, причем может быть изменена система уравнений, задающая закон непрерывной эволюции объекта. Таким образом мы рассматриваем комбинированные непрерывно-дискретные системы переменной структуры.

В общем случае под непрерывно-дискретной системой понимают конечную совокупность (переменного состава) взаимодействующих объектов. Взаимодействие объектов может быть дискретным и непрерывным. Дискретное взаимодействие — это такое мгновенное изменение в системе, как появление нового объекта или уничтожение старого, скачкообразное изменение состояния объекта. Непрерывное взаимодействие понимается как реализация установленных функциональных зависимостей между состояниями объектов, определяемыми их параметрами. Фиксированные функциональные зависимости сохраняются лишь на конечном интервале времени. Их установление и отмена также являются актами дискретного взаимодействия объектов. Развито много языков программирования для имитационного моделирования непрерывных и дискретных систем [1, 2]. Некоторые из них ориентированы на моделирование непрерывно-дискретных систем. Эти языки исторически развивались от чисто дискретных к непрерывно-дискретным [3]. Может показаться странным то, что при обилии специализированных языков моделирования большинство практических приложений выполнено на ФОРТРАНе.

С точки зрения математического моделирования энергоблок АЭС — это типичная непрерывно-дискретная система. Дискретные события в этой системе вызываются несколькими причинами: срабатыванием технологических защит; дистанционным открытием или закрытием задвижек; отказом исполнительных механизмов системы управления; переключением источников электроснабжения собственных нужд и т.д. В математических моделях появляются дополнительные нарушения непрерывности, которые естественно интерпретировать как события, это, прежде всего, переключения с одной модели на другую при достижении границ применимости первой модели.

При уменьшении тактовых интервалов точность контроля последовательности событий увеличивается. Последовательность операторов управления предназ-

начена для моделирования действий субъекта управления. Фактически при имитации динамики объекта эти операторы вводятся с терминала субъекта управления в темпе модельного времени.

Основные функции и компоненты системы ПРИМ.
Интегрированная система ПРИМ предназначена для выполнения следующих действий.

1. Последовательное конструирование исследовательской математической модели из библиотечных элементов.

2. Пополнение библиотеки элементов математическими моделями типовых агрегатов оборудования, разработанными пользователем.

3. Подготовка начальных условий для имитации.

4. Генерация программы-имитатора для работы в операционных системах *UNIX* или *MS-DOS*.

5. Выполнение программы-имитатора в среде ПРИМ.

6. Хранение результатов имитации (динамик).

7. Визуализация динамических характеристик моделей, табличное или графическое сравнение различных динамик, подготовка отчетов.

8. Вывод справочных сведений по системе ПРИМ.

В соответствии с этими функциями в системе ПРИМ выделяются следующие компоненты.

1. Библиотека математических моделей элементов технологических схем.

2. Диалоговая подсистема конструирования математических моделей.

3. Диалоговая подсистема постановки начальных условий.

4. Компилятор с внутреннего языка описания математических моделей на язык "С".

5. Монитор выполнения программы-имитатора в среде ПРИМ.

6. Файловая система.

7. Диалоговая подсистема визуализации динамик и подготовки отчетов.

8. Информационно-справочная подсистема.

В библиотеке математических моделей элементов технологических схем хранятся стандартные модели (входящие в состав системы ПРИМ) и модели, подготовленные пользователем на внутреннем языке описания математических моделей. Внутренний язык описания моделей включает в себя основные конструкции языка "С" и ряд дополнительных конструкций, специфичных для системы ПРИМ. Для пользователя системы ПРИМ знание внутреннего языка необязательно. В тех случаях, когда исследовательская математическая модель может быть сконструирована на основе стандартных моделей библиотеки, внутренний язык описания моделей не применяется.

Диалоговая подсистема конструирования математических моделей поддерживает два способа конструирования: нисходящий и восходящий. При восходящем способе конструирования основной операцией является соединение ранее сконструированных или библиотечных моделей в новую модель. При этом пользователь определяет связи между переменными состояниями объединяемых моделей. Новой модели присваивается

имя, она записывается в библиотеку математических моделей или в ее временную копию и может использоваться как элемент в последующих операциях соединения. При нисходящем способе конструирования основной операцией является декомпозиция модели. Модель, существующая только в замысле, разбивается пользователем на подмодели, между которыми установлены определенные связи. Выделенная в процессе декомпозиции подмодель может быть либо библиотечной подмоделью, либо временно неопределенной моделью, для которой снова можно применить операцию декомпозиции. Конструирование больших моделей может проводиться обоими способами. Количество сеансов, затрачиваемых на одной модели, не ограничивается. В процессе конструирования проверяется полнота модели, понимаемая как соответствие количества динамических переменных количеству уравнений модели. Генерация программы-имитатора возможна только для моделей, удовлетворяющих критерию полноты. В случае неполноты модели подсистема конструирования требует от пользователя введения в нее новых связей или новых элементов.

Диалоговая подсистема постановки начальных условий используется для создания или редактирования начальной записи файла динамики. При запуске программы-имитатора в среде ПРИМ диалоговая система постановки начальных условий вызывается в начале имитации, если файл динамики, соответствующий данному акту имитации, не существует. При автономном запуске программы-имитатора начальная запись файла динамики должна быть предварительно создана с помощью подсистемы подготовки начальных условий, которые для части динамических переменных могут не задаваться. Подсистема подготовки начальных условий проверяет соответствие количества заданных начальных условий количеству дифференциальных уравнений в модели.

Компилятор с внутреннего языка описания математических моделей на язык "С" генерирует программу-имитатор для исследовательской модели, удовлетворяющей критерию полноты. Предусматривается несколько режимов компиляции в зависимости от предполагаемого использования программы-имитатора. У пользователя запрашивается тип операционной системы, в которой предполагается выполнять программу-имитатор, тип терминала субъекта управления, возможность выполнения в среде ПРИМ. Генерируемая программа имеет сложную структуру, в частности, в ее состав включается управляющий файл интерпретатора достижения целей.

Монитор выполнения программы-имитатора в среде ПРИМ компилирует и загружает программу-имитатор и запускает ее. При ее выполнении в среде ПРИМ возможна временная приостановка имитации с переходом в диалоговую подсистему визуализации. Монитор разрабатывается в форме файла командных процедур соответствующей операционной системы.

Файловая система ПРИМ функционирует как часть файловой системы *UNIX* или *MS/DOS*, для которых разрабатываются версии системы ПРИМ.

Диалоговая подсистема визуализации динамик и подготовки отчетов обеспечивает сервисные средства для работы с файлами динамик и вывода на печать результатов имитации.

Информационно-справочная подсистема может быть вызвана практически в любой момент диалогового взаимодействия с системой ПРИМ. Справочник этой подсистемы содержит расширяемый набор статей, каждая из которых имеет заголовок. Для вызова подсистемы резервируется одна из функциональных клавиш клавиатуры терминала. После вызова информационно-справочной подсистемы на экран выводится начало статьи, заголовок которой указывался курсором до вызова. Если текст, на который указывал курсор, не является заголовком статьи, на экран выводится начало корневой статьи справочника. В тексте статей выделяются заголовки других статей и их синонимы, что позволяет свободно передвигаться по справочнику. Функции таких компонент, как диалоговая подсистема постановки начальных условий, диалоговая подсистема визуализации, монитор выполнения программы-имитатора и информационно-справочная подсистема, весьма прозрачны. Аналогичные компоненты имеются в большинстве современных интегрированных систем, поэтому мы ограничиваемся в рамках технического задания функциональным описанием, приведенным выше.

Библиотека математических моделей элементов технологических схем. Для каждой элементарной математической модели в библиотеке системы ПРИМ хранятся следующие атрибуты:

- имя элементарной математической модели;
- количество динамических переменных;
- количество входных переменных-событий;
- количество выходных переменных-событий;
- количество уравнений в блоке уравнений модели;
- обобщенный портрет вхождений динамических переменных в блок уравнений;
- названия динамических переменных и переменных-событий;
- С-функция расчета выходных переменных-событий;

- С-функция расчета невязок уравнений;
- С-функция расчета частных производных невязок.

Обобщенный портрет вхождений динамических переменных в блок уравнений — это прямоугольная матрица $J \times N$ с целочисленными элементами, которая содержит априорную информацию о способе обработки уравнений на этапе имитации.

В качестве названия переменной используются: текстовая строка, содержащая русские буквы (прописные и строчные), латинские буквы, цифры и символ подчеркивания. Название переменной не содержит пробелов. В тексте С-функций, являющихся атрибутами элементарной модели, динамические переменные и переменные события обозначаются либо своим названием, либо идентификатором вида $X\langle n \rangle$, где $\langle n \rangle$ — номер переменной. В теле С-функций динамические переменные и переменные события считаются глобальными, т.е. описанными вне тела функций. Все три функции имеют тип *int* и возвращают ноль, если входные данные лежат в области определения функции. Функция расчета невязок помещает результат в глобальный массив Y . Функция расчета частных производных невязок помещает результаты в глобальные массивы A , ROW и COL , причем в массив A помещаются значения производных, в целый массив ROW — номера уравнений, в целый массив COL — номера переменных.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. М.: Радио и связь, 1988.
2. Spriet J.A., Vansteenkiste G.C. Computer-aided modelling and simulation. Academic Press, 1982.
3. Прицкер А. Введение в имитационное моделирование и язык СЛАМ 2/Пер. с англ. М.: Мир, 1987.

Статья поступила в редакцию

25 июля 1991 г.

Вопросы атомной науки и техники. Сер.
Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 89—92.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Аксенов В.И., Алиев А.В., Ефимов В.А., Колесников А.И., Свиридов В.А., Чупалов А.М. Опыт создания и использования тренажеров в НИТИ	3
Алиев А.В., Батраков С.В., Хайрутдинов А.Х., Чупалов А.М. Системное обеспечение исследовательских тренажеров	6
Аксенов В.И., Морозов Ю.А., Дзигаленко С.М., Привалов В.М. Технические средства судового тренажерного комплекса	8
Аршавский И.М., Кропилин А.Е., Селезнев Е.Ф. Обзор методов построения математического обеспечения тренажеров АЭС	10
Малкин С.Д., Ракитин И.Д., Сивоконь В.П., Шалы В.В. Многоцелевые моделирующие комплексы — основа для исследования тяжелых аварий, проектирования и совершенствования систем управления ЯЭУ	18
Маркитан А.Г., Панин В.М., Подлазов Л.Н. Верификация сложных программных комплексов расчета динамики энергетических реакторов на основе экспериментальных данных	22
Ионов А.И., Подлазов Л.Н., Рогова В.Д. О влиянии степени дискретизации пространства на результаты расчетного моделирования динамики нейтронных полей реактора РБМК	25
Алексаков А.Н., Захарова В.В., Николаев Е.В., Павлов В.Б. Средства моделирования процессов в комплексе технологических систем энергоблока с РБМК	30
Алексаков А.Н., Захарова В.В., Павлов В.Б., Рублева Н.В. Упрощенная модель нестационарной теплогидравлики контура циркуляции кипящих реакторов	38
Сахарова Т.Ю., Ионов А.И. Моделирование теплогидродинамических процессов в парогенерирующем канале	41
Кавун О.Ю., Таранов Г.С., Мальцев М.Б., Никитин А.Ю. Моделирование режима разрыва парового коллектора парогенератора с учетом трехмерной модели активной зоны	43
Афанасьев А.М., Афанасьева А.А. Быстродействующий алгоритм расчета полномасштабных трехмерных полей нейтронов в реакторе	47

C O N T E N T S

Aksenov V.I., Aliyev A.V., Yefimov V.A., Kolesnikov A.I., Sviridov V.A., Chupalov A.M. A history of developing and applying simulators at R&D Technology institute	3
Aliyev A.V., Batrakov S.V., Khairutdinov A.Kh., Chupalov A.M. System software for research simulators	6
Aksenov V.I., Morozov Yu.A., Dzigalenko S.M., Privalov V.M. Technical means of a ship's simulating complex	8
Arshavsky I.M., Crochilin A.E., Seleznev E.F. The review of construction methods for AES training simulator software	10
Malkin S.D., Rakitin I.D., Sivokon V.P., Shalya V.V. Multipurpose modelling complexes — a basis for investigating heavy accidents, designing and improving control system of NPP	18
Markitan A.G., Panin V.M., Podlazov L.N. Verifying complex program complexes for calculating power reactor dynamics based on experimental data	22
Ionov A.I., Podlazov L.N., Rogova V.D. Influence of the space discretization degree on the results of design modelling the dynamics of neutron fields of RBMK reactor	25
Aleksakov A.N., Zakharova V.V., Nikolayev E.V., Pavlov V.B. Means of modelling the processes in a complex of technological power unit systems with RBMK	30
Aleksakov A.N., Zakharova V.V., Pavlov V.B., Rubleva N.V. A simplified model of nonstationary thermohydraulics of boiling reactor circulation circuit	38
Sakharova T.Yu., Ionov A.I. Modelling thermohydrodynamic processes in steam-generating channel	41
Kavun O.Yu., Taranov G.S., Maltsev M.B., Nikitin A.Yu. Modelling a mode of steam-generator steam header disruption taking core three-dimensional model into account	43
Afanasyev A.M., Afanasyeva A.A. A fast algorithm for calculating full scale three-dimensional neutron fields in a reactor	47

Конеv В.Н., Торлин Б.З. Метод поканального расчета ядерного реактора на основе крупной сетки	51	Konev V.N., Torlin B.Z. A method of channel-by-channel calculation of a nuclear reactor based on coarse grid	51
Александрова Т.И., Гарусов Ю.В., Кириллова Л.Г., Свечаревский Б.М., Сологуб И.В., Сытенко А.В. Разработка методов, алгоритмов и программ для исследования процессов нейтронной кинетики в реакторе РБМК-1000	58	Aleksandrova T.I., Garusov Yu.V., Kirillova L.G., Svecharevsky B.M., Sologub I.V., Sytenko A.V. Developing methods, algorithms and programs for investigation of neutron kinetics processes in RBMK-1000 reactor	
Ковтунов В.Ф., Симоненко С.И. Экспериментальные исследования человеко-машинного взаимодействия на исследовательском тренажере ядерной энергетической установки	63	Kovtunov V.F., Simonenko S.I. Experimental study of man-computer interaction under accidents at NPP	63
Охотин В.В., Плутинский В.И., Кузнецов Н.Д., Барыкова Н.Г., Балашов А.И., Кузин Г.А. Компьютеризированные учебно-тренировочные занятия на ПЭВМ учебно-тренировочных пунктов вузов и АЭС	67	Okhotin V.V., Plyutinsky V.I., Kuznetsov N.D., Barykova N.G., Balashov A.I., Kuzin G.A. Computerized classes for training PC in training centers of high schools and NPP	67
Воропаев А.И., Галкин Н.В., Зинин А.И., Королев И.З., Кукса А.С., Липанов Б.М., Макаров А.А., Макаров О.И., Руденко В.А. Разработка технических средств обучения эксплуатационного персонала АЭС с реактором типа БН	71	Voropayev A.I., Galkin N.V., Zinin A.I., Korolev I.Z., Kuksa A.S., Lipanov B.M., Makarov A.A., Makarov O.I., Rudenko V.A. Role of technical means when organizing a training process for NPP personnel	71
Гладышев М.Е., Позняков В.В., Сивоконь В.П. Программа для демонстрации на ПЭВМ особенностей и эффективности органов управления и защиты РБМК	76	Gladyshev M.E., Poznyakov V.V., Sivokon V.P. A program to demonstrate through PC the peculiarities and efficiencies of RBMK control and protection bodies	76
Шаленинов А.А., Кузнецова Т.А., Наумов С.А., Клущин Е.А., Ревенко В.Ф. Автоматизация программирования задач моделирования динамики ЯЭУ	78	Shaleninov A.A., Kuznetsova T.A., Naumov S.A., Klushin E.A., Revenko V.F. Programming the NPP dynamics modelling problems computerized	78
Иванов А.П., Сизова Т.Б., Михейкина Н.Д., Санковский Г.А., Тюфягин А.Н. Автоматизация разработки программных моделей объектов управления сложной структуры (на примере нелинейной динамической модели энергоблока АЭС)	82	Ivanov A.P., Sizova T.B., Mikheikina N.D., Sankovsky G.A., Tyufyagin A.N. Automation of program model developing for complex structure control objects (using an example of nonlinear dynamic model of NPP power unit)	82
Зинин А.И. Интегрированная система для разработки и анализа исследовательских моделей технологического оборудования АЭС	89	Zinin A.I. An intergrated system for developing and analysing research models of NPP technological equipment	89

ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

С е р и я: Физика ядерных реакторов
В ы п у с к 5

Технический редактор С.К. Сведлова
Корректоры Г.А. Матвеева, Л.В. Пономарева

Подписано в печать 24.02.92. Формат 60×90/8
Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,0. Уч.-изд. л. 13,5 + 0,5 вкл.
Тираж 220 экз. Индекс 3646. 21 статья. Заказ 48

Отпечатано в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова
123182 Москва, пл. Академика Курчатова

4 р. 05 к.

Индекс 3646

ISSN 0205—4671. Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 1—96.