

УЧЕБНЫЕ ТРЕНАЖЕРЫ

УДОБСТВО ОБУЧЕНИЯ НА МОДЕЛЯХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

АВРОРА БАДУЛЕСКУ И РОБЕРТ ЛАЙОН

Учебные пособия на базе компьютеров становятся обычными компонентами программ обучения. В последние годы в ядерной отрасли предприняты важные шаги по расширению услуг в области образования и обучения путем использования моделей ядерных реакторов.

В рамках своих программ МАГАТЭ поддерживает разработку таких моделей, которые базируются на персональных компьютерах и имитируют реагирование реакторов различных типов на разные условия эксплуатации и аварийные ситуации. Эти модели являются учебным пособием для университетских профессоров и инженеров, ведущих занятия по тем или иным темам в области ядерной энергии; кроме того, они предоставляются непосредственно студентам, младшим специалистам-инженерам, а также старшим инженерам и научным работникам, заинтересованным в расширении своих познаний в данной области. Агентство организует предоставление или разработку соответствующих программ моделирования и учебных материалов, проводит учебные курсы и семинары-практикумы, а также распространяет документацию и компьютерные программы.

С 1997 г. состоялись десять практикумов МАГАТЭ, проходивших в Вене, Австрия, и в Египте, Саудовской Аравии, Республике Корея и Италии. В целом прошли обучение и получили возможность пользоваться моделями более 181 участника из 42 стран.

Обучение с помощью имитирующих устройств позволило

участникам достаточно хорошо освоить применение моделирующих программ. Сочетание лекционных курсов по физике и управлению реакторами и возможности проверить свои знания на имитирующих устройствах, безусловно, послужило весьма эффективным средством поддержания интереса участников и передачи знаний о характерных особенностях эксплуатации различных реакторных систем. В ряде случаев использование моделей включается или будет включено в учебные программы национальных университетов или учебных курсов.

В данной статье описываются программы моделирования, поддерживаемые МАГАТЭ. Имеются четыре различные программы по реакторам разных типов, включая реакторы с охлаждением водой под давлением (PWR), реакторы с кипящей водой (BWR) и тяжеловодные реакторы (HWR). Использование программ моделирования ограничивается представлением общих характеристик поведения систем выбранных типов энергетических реакторов и не предназначено для специфических целей применительно к конкретным АЭС, таких как проектирование, оценка безопасности, лицензирование или подготовка операторов.

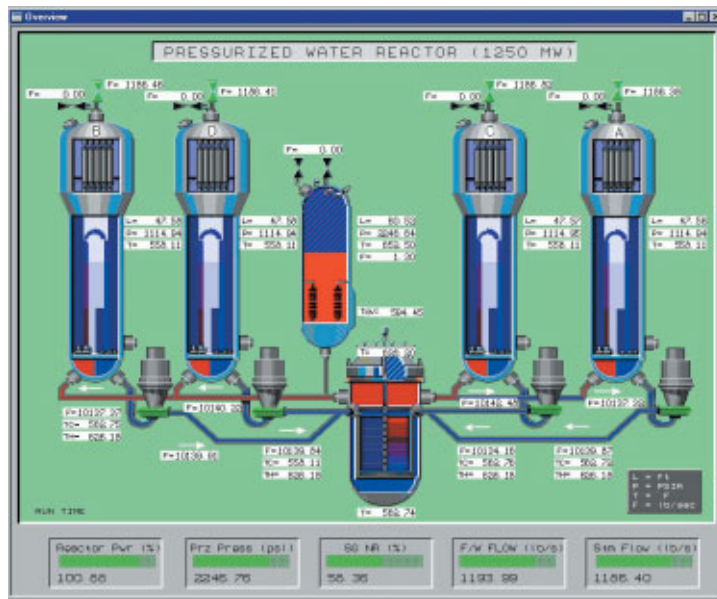
Усовершенствованные устройства демонстрации работы реакторов в учебных аудиториях (CARD). Такое устройство представляет собой набор моделей АЭС, разработанный в Canadian Aviation Electronics (CAE) Ltd. Набор состоит из моделей PWR, BWR и HWR и применяется на типич-

ном персональном компьютере. Модели базируются на основных принципах конструкции реакторов и разработаны до уровня дискретных компонентов. В управляющей логике используются принципиальные схемы АЭС с включением динамических моделей гидравлических контуров. Модели калибруются в полном соответствии с проектом и характеристиками АЭС.

В имитирующих устройствах CARD используется цветная графика для вывода на экран данных по потоку нейтронов, температуре и полостям в активной зоне, а также показателей состояния таких устройств, как насосы и клапаны. Каждая из трех реакторных моделей обозначается сокращением CARD. Пакет моделей служит для демонстрации, а не как учебное имитирующее устройство. Хотя используемые в CARD модели являются уменьшенными вариантами усовершенствованных полномасштабных имитирующих устройств, разработанных CAE, содержание этого пакета ограничено лишь программным обеспечением, необходимым для демонстрации общего поведения АЭС, оцениваемого по функционированию системы подачи пара ядерного контура, при моделировании всех границ этой системы для представления общей динамики реагирования.

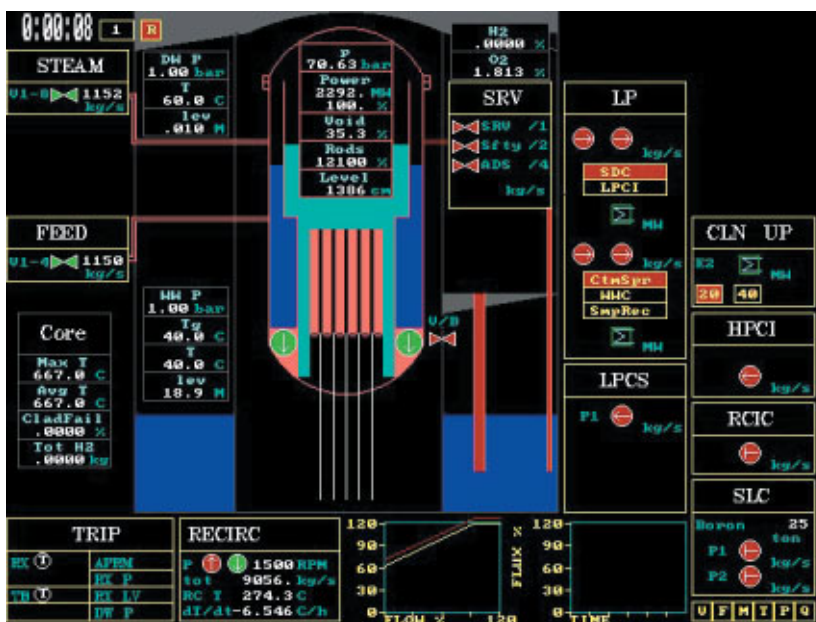
В демонстрационных устройствах используются термогидравлическая и реакторная моде-

Г-жа Бадулеску и г-н Лайон – сотрудники Отдела ядерной энергетики, Департамент ядерной энергии МАГАТЭ.



ли САЕ. Устройства включают полную нейтронную и термодинамическую модель реактора и его систем охлаждения. Для получения реалистичной картины реагирования имитируются интерфейсы с соседними системами. В устройствах применяется удобный для пользователя интерфейс человек-машина на графической основе для ввода различных данных, имитации отказов и демонстрации поведения систем.

Графическое изображение на экране охлаждающего контура реактора PWR состоит из четырех контуров теплопередачи, соединенных параллельно корпусу реактора. Каждый контур содержит реакторный насос для подачи теплоносителя и парогенератор. Система включает компенсатор давления с отводным баком, внутренние трубопроводы, клапаны и необходимые приборы оперативного управления (см. фото).



Усовершенствованный имитатор реактора. Это имитирующее устройство было разработано в США компанией Microsimulation Technologies и базируется на типичном персональном компьютере. На нем моделируется работа PWR, BWR и HWR в диапазоне 600 МВт (эл.). В моделях PWR имитируются установки с вертикальными парогенераторами в форме перевернутой буквы U, разработанными по западным проектам, и с горизонтальными парогенераторами по проектам бывшего Советского Союза, а также PWR нового поколения с характеристиками пассивной безопасности.

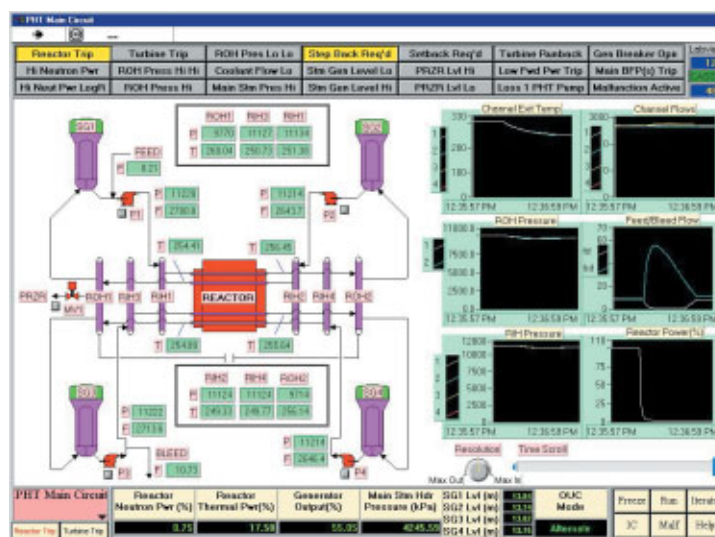
Имитатор действует в реальном или ускоренном времени с охватом системы подачи пара из ядерного контура, внешней защиты, систем управления и систем безопасности. Примеры отказов и параметры могут быть выбраны для моделирования нормальных и аномальных условий, заложенных в проекте, применительно к каждому типу реактора. Могут имитироваться также условия вне проектной основы.

Управляемая система представлена на дисплее в виде небольших индикаторных панелей. Ее основные компоненты, такие как перепускные клапаны с электрическим управлением, предохранительные клапаны компенсатора давления и паропроводов, разбрызгивающий клапан и нагреватели компенсатора

Фото: Вверху – компьютерный дисплей контура охлаждения реактора с охлаждением водой под давлением, используемый в усовершенствованном реакторном демонстрационном устройстве для занятий в аудитории. Внизу – компьютерный экран усовершенствованного имитатора реактора с кипящей водой, базирующегося на типичном персональном компьютере.

давления, основные клапаны изоляции пара, клапаны для сброса пара в обход турбины и клапан подачи питательной воды, а также насосы для подачи теплоносителя в реактор обозначены на экране пиктограммами. Состояние этих компонентов определяется по цвету пиктограмм и может быть изменено оператором вручную с помощью мыши для выбора объектов действия (например, нажать кнопку управления, включить насос). Доступ с помощью клавиатуры требуется только для таких операций, как ввод данных по неисправностям, новых исходных условий и разных значений для рассмотрения тенденций в развитии ситуации. На экране видны положение и движение стержней управления. Места разрывов трубопроводов обозначаются брызговыми вспышками с указанием цифровых значений размеров утечки.

Обычно работа на имитирующем устройстве начинается с выбора исходных условий из набора различных характеристик мощности, расхода теплоносителя и срока эксплуатации установки. В ходе операции на имитаторе изображается состояние АЭС в динамике, и оператор может имитировать неисправности всех категорий, анализируемых в техническом обосновании безопасности АЭС (а в некоторых случаях — и за его пределами). Вводятся данные по каждой неисправности, включая ее серьезность, время задержки и время нарастания. На имитаторе оператор может выключить турбину или остановить реактор и корректировать вручную положение клапанов или насосов, вызывая включение/выключение или частичный отказ при работе на неполной мощности. Например, оператор может блокировать автоматический запуск насосов системы аварийного охлаждения активной зоны и начать ручное управление. Наряду со степенью серьезности отказа (например, величины раз-



рыва трубы) можно произвести выбор из числа характерных неисправностей каждого реактора, содержащихся в техническом обосновании безопасности АЭС. К типичным неисправностям относятся потеря теплоносителя, разрыв линии подачи пара, прекращение подачи питательной воды, нарушение циркуляции.

На дисплей выведены данные по состоянию системы защиты реактора и ввода в действие механизма обеспечения безопасности. Реактор автоматически остановится при условиях, превышающих любую из уставок реакторной системы защиты. Соответствующий ей символ станет красным, и все контрольные стержни будут введены в активную зону.

В ходе имитации переменные выходные параметры можно видеть на экране в виде графиков "тенденций". После окончания имитации можно получить распечатки графиков. Оператор может, если требуется, записать в выходные файлы рассчитанные переходные параметры для детального анализа после моделирования.

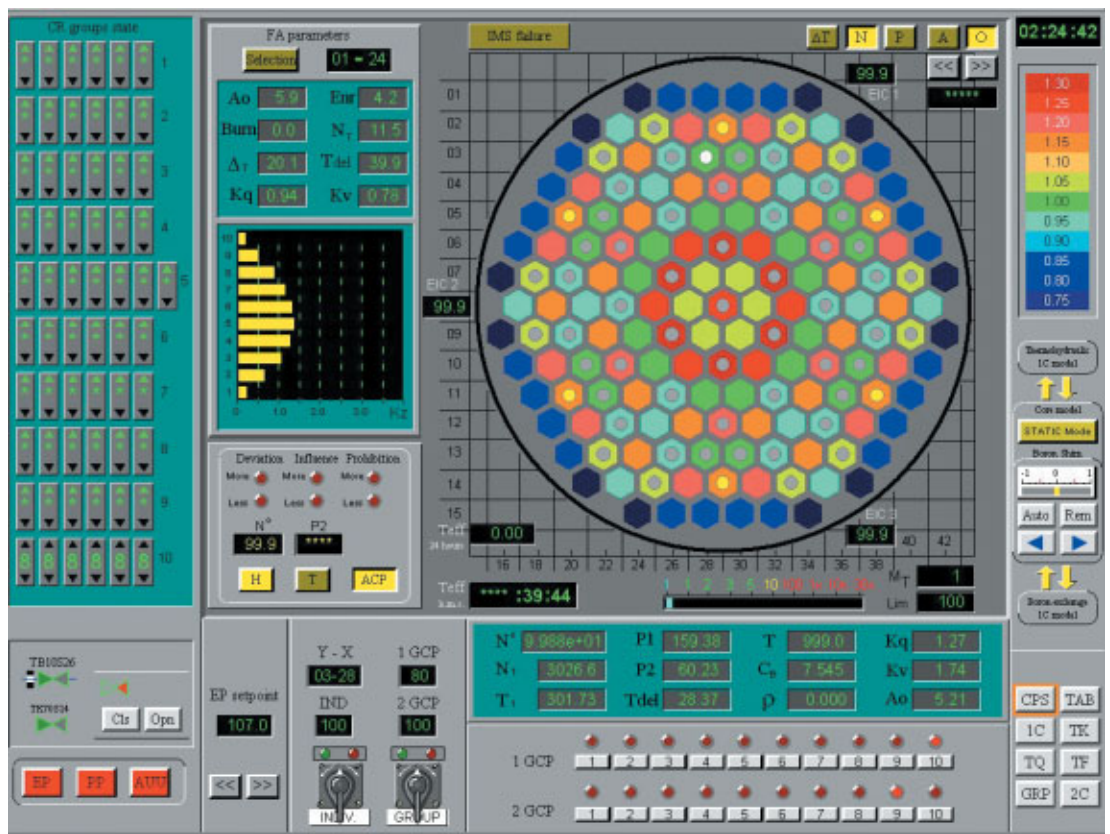
Компактный имитатор реактора CANDU-9. Этот имитатор, разработанный компанией Cassiopeia Technologies Inc., имеет 16 интерактивных экранов

визуального представления данных, отображающих полную картину систем реактора, включая подсистемы, системы управления и безопасности. В верхней и нижней частях табло на каждом экране имеются индикаторы, отображающие 21 сигнал тревоги и оповещения, состояние имитатора, основные события и параметры установки. Взаимодействие между пользователем и имитатором осуществляется путем комбинированного использования монитора, мыши и дисплея. Приборы пульта управления и устройства управления, такие как кнопки и рубильники, показаны в виде стилизованных изображений и приводятся в действие высвечиванием специальных меню и диалоговых блоков в соответствии с вводными пользователя.

В имитаторе используется принцип объектной ориентации, и он реагирует на эксплуатационные условия, обычно встречающиеся в работе АЭС, а также на многие ситуации, возникающие вследствие неисправностей.

При отображении общего плана установки основной контур

Фото: Компьютерный дисплей компактного имитатора реактора CANDU-9.



теплопередачи и системы контроля давления и суммарного количества теплоносителя показаны как единый контур. Четыре парогенератора моделируются по отдельности. Для контроля реактивности имеется специальный экран, на котором показаны диаграммы контроля пределов активности и состояние трех устройств контроля активности, управляемых системой регулирования работы реактора.

Осуществляется полное динамическое взаимодействие всех имитируемых систем — регулятора мощности установки, систем оповещения и компьютерного контроля всех главных системных функций.

Компактный компьютерный имитатор реактора ВВЭР-1000. Этот имитатор, разработанный на факультете физики реакторов Московского государственного инженерно-физического института, работает в трех основных режимах: под-

готовка (конфигурация) моделирования, работа с моделями, визуализация и анализ результатов имитации. Имитатор имеет восемь экранов, показывающих основные технологические системы, и моделирует нормальную эксплуатацию и аномальные ситуации, связанные с реагированием систем безопасности и дефектами оборудования.

Имитатор работает на базе интегрированного программного пакета с широким набором функций по разработке и управлению имитационными комплексами. Система предоставляет следующие возможности: упорядоченная форма хранения и представления рабочих файлов; простота обращения с другими компонентами; простой метод построения конфигурации имитационных сессий; и хранение файлов результатов.

Топливо моделируется в трех измерениях, а для теплоносителя активной зоны используется го-

могенная термогидравлическая модель. Модель кинетики нейтронов может функционировать в 30 тыс. раз быстрее реального времени, что очень удобно при изучении процессов выгорания и ксенонового отравления.

В имитаторе используется также модель регулятора содержания бора, пригодная для регулирования вручную концентрации бора за длительный период времени. В имитаторе также предусмотрен режим отключения системы регулирования работы АЭС и перехода на ручное управление.

Обеспечен процесс мониторинга для оценки умения практиканта обращаться с имитатором. □

Фото: Компьютерный дисплей компактного имитатора ВВЭР-1000.