

УДК 621.039-78

## УЧЕБНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ «ПАРУС» ПО РЕАКТОРНОЙ ФИЗИКЕ, УПРАВЛЕНИЮ И БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС С ВОДО-ВОДЯНЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ РЕАКТОРОМ

С.А. КОРОЛЕВ, С.Б. ВЫГОВСКИЙ, Е.В. ЧЕРНОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет  
«Московский инженерно-физический институт»  
Каширское шоссе, 31, Москва, 115409, Россия*

*Поступила в редакцию 29 января 2015*

На современном этапе развития атомной энергетики все страны и компании, развивающие ядерные технологии и эксплуатирующие атомные станции, с возросшей ответственностью относятся к проблемам ядерного образования, сохранения, управления и развития ядерных знаний.

Активно создаются и совершенствуются образовательные программы университетов, обеспечивающих выпуск специалистов в области ядерных технологий и смежных инженерно-технических областях, программы профессиональной подготовки, переподготовки и повышения квалификации работников атомных станций и других предприятий и организаций атомной отрасли. Образовательные программы все активнее опираются на современные информационные технологии и использование разнообразных технических средств обучения (ТСО). Происходит компьютеризация лабораторных практикумов – от обработки результатов работы до замены лабораторных установок компьютерными моделирующими программами. Для образовательных программ университетов характерно стремление активно использовать специализированные лабораторные практикумы и компьютерные обучающие системы (курсы), которые уже давно используются в профессиональной подготовке персонала АЭС.

Системы профессиональной подготовки персонала атомных станций в обязательном порядке используют тренажерные системы различных классов: тренажеры базовых принципов, тренажеры отдельных технологических систем и элементов оборудования, полномасштабные тренажеры (ПМТ). Тренажеры основаны на достаточно полной и точной модели физических и технологических процессов атомной станции и при этом предназначены для формирования практических навыков контроля и управления технологическим оборудованием энергоблока.

При этом современный уровень развития компьютерной техники, математических методов моделирования и средств создания программных моделей ядерных энергетических установок позволяет создавать компактные и относительно недорогие моделирующие вычислительные комплексы реального времени. Данные комплексы вполне доступны с точки зрения их использования не только в тренажерных системах, но и в специализированных учебных лабораториях, предназначенных для оснащения университетов и учебных центров АЭС.

На кафедре «Автоматика» НИЯУ МИФИ создана учебная лаборатория «ПАРУС» для студентов и специалистов атомной отрасли в области реакторной физики, контроля, управления, защиты и безопасной эксплуатации реакторных установок действующих, проектируемых и строящихся АЭС с ВВЭР (рисунок). Математическое и программное обеспечение лаборатории базируется на программных комплексах, входящих в состав полномасштабных, компьютерных тренажеров и анализаторов режимов работы АЭС. В частности компьютерная система лаборатории включает компоненты моделирующего обеспечения полномасштабных тренажеров (ПМТ) блоков № 2, № 3 и № 4 Калининской АЭС и

анализаторов реакторных установок для 1, 2, 3 энергоблоков Ростовской АЭС и 6-го энергоблока Ново-Воронежской АЭС. Основу этих тренажеров и анализаторов составляет аттестованный ГАН РФ для расчетов ЯЭУ с ВВЭР-1000 программный комплекс «ПРОСТОР».



Учебная лаборатория «ПАРУС»

По точности расчета основных параметров реакторной установки ЯЭУ модели вышеупомянутых анализаторов не уступают штатным программам расчетного сопровождения эксплуатации АЭС с реактором ВВЭР-1000. Комплексность и высокая адекватность используемых в лаборатории моделей физических процессов в оборудовании АЭС и алгоритмов систем управления и защиты ЯЭУ позволяют решать широкий спектр учебных и исследовательских задач, а также обеспечивают возможность их дальнейшего развития.

Учебная лаборатория «ПАРУС» обладает в сравнении с моделями для тренажерных систем и, в частности для ПМТ, следующими дополнительными возможностями:

- модель позволяет реализовать широкую вариативность учебных и практических задач: от расчета основных нейтронно-физических и теплофизических характеристик ЯЭУ и исследования алгоритмов управления до задач анализа тяжелых аварий, приводящих к расплавлению топлива в активной зоне;

- модель дополнена удобными для пользователя средствами проектирования сценариев учебных занятий и внешнего управления моделью для решения практических задач;

- модель базируется на библиотеке нейтронных сечений и тепло-гидравлических характеристик, насчитывающих до 100 различных конструкций ТВС реактора ВВЭР, позволяющих проводить изучение различных топливных загрузок;

- модель содержит средства воспроизведения режима выгорания топлива с его произвольной перегрузкой и задания произвольного графика тепловых нагрузок на активную зону в зависимости от времени выгорания;

- в модель включены средства поддержания критичности реактора как с помощью штатных средств на АЭС, так и с помощью автоматического борного регулятора (не штатное средство), работающего как в стационарных, так и в нестационарных режимах;

- модель обладает возможностью ускорения по времени в десятки тысяч раз, что позволяет обеспечить эффективность учебного и исследовательского процессов при воспроизведении инерционных процессов в оборудовании АЭС;

- модель позволяет проводить расчетный анализ технической безопасности оборудования ядерных энергетических установок (ЯЭУ) при задании специальных условий моделирования гидродинамики теплоносителя в главном циркуляционном контуре (ГЦК), приводящих к консервативной оценке уровня безопасности.

Лаборатория предназначена для обеспечения:

- образовательных программ высшего профессионального образования специалистов, бакалавров, магистров по направлениям подготовки и специальностям: Ядерная физика и технологии, Ядерные реакторы и материалы, Атомные станции: проектирование, эксплуатация и

инжиниринг, Электроника и автоматика физических установок, Ядерная энергетика и теплофизика;

- программ послевузовского образования (аспирантуры) по ряду специальностей, в том числе: Ядерные энергетические установки, Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, Теплофизика и теоретическая теплотехника;

- программ повышения квалификации специалистов соответствующих специальностей;

- программ профессиональной подготовки работников отраслевых предприятий и организаций, области ответственности и деятельности которых связаны с проектированием, созданием и эксплуатацией технологического оборудования и систем управления ядерных энергетических установок.

В рамках данных направлений подготовки учебная лаборатория обеспечивает практические занятия по спектру дисциплин специальностей, связанных с физикой ядерных реакторов и ядерных энергетических установок, проектированием и эксплуатацией АЭС, управлением ядерным реактором и ЯЭУ, системами управления и защиты ядерных реакторов, АСУТП АЭС, безопасностью эксплуатации ЯЭУ, моделированием процессов в оборудовании ЯЭУ.

Учебная лаборатория предназначена:

- для практического освоения теоретических знаний по конструкции активной зоны и оборудованию ЯЭУ, назначению и составу технологических систем ЯЭУ, нейтронно-физическим и технологическим процессам в оборудовании ЯЭУ, эксплуатационным режимам и принципам безопасной эксплуатации ЯЭУ, назначению и структуре систем управления и защиты, принципам и алгоритмам управления ЯЭУ;

- для приобретения практических навыков по управлению ЯЭУ с реактором ВВЭР-1000 (1200) в режимах нормальной эксплуатации и режимах с нарушениями нормальной эксплуатации, по формированию различных топливных загрузок при реализации различных стратегий топливного цикла, по определению нейтронно-физических характеристик активной зоны;

- для выполнения научно-исследовательской работы студентами и аспирантами, проведения курсового проектирования, выпускных квалификационных работ, магистерских диссертаций;

- для приобретения теоретических знаний и практических навыков специалистами отрасли по управлению и эксплуатации ЯЭУ.

Функциональные возможности модели ЯЭУ позволяют на средствах учебной лаборатории «ПАРУС» проводить научные исследования студентов, магистрантов, аспирантов и научных сотрудников университетов для исследования и уточнения алгоритмов управления энергоблоком в тех режимах эксплуатации, для которых в настоящее время имеется дефицит эксплуатационного опыта и, соответственно, процедуры управления недостаточно регламентированы.

Учебные цели программ обучения достигаются посредством реализации практических задач при выполнении комплекса лабораторных работ в соответствии с предварительно разработанными сценариями их выполнения, или в виде индивидуальных заданий студентам на проведение курсового и дипломного проектирования с разработкой сценариев совместно с преподавателем.

В настоящее время в рамках учебной лаборатории реализованы лабораторные практикумы, охватывающие следующие учебные темы:

- Изучение статических и динамических характеристик реактора как объекта управления. Управление мощностью реактора. Определение оптимальных параметров алгоритма регулирования мощности ЯЭУ в регуляторах, задействованных в этом управлении.

- Изучение системы управления и защиты реактора (СУЗ), знакомство со структурой СУЗ ЯЭУ с ВВЭР-1000 (АРМ, РОМ, АЗ), алгоритмами работы СУЗ в различных режимах (режимы работы АРМ, ПЗ-3, ПЗ-4, АЗ-1, УПЗ), включая аварийные ситуации.

- Изучение эксплуатационных режимов с нарушениями условий нормальной эксплуатации и решение ряда эксплуатационных задач по управлению энергоблоком в нестандартных ситуациях с целью обеспечения локальных защит по распределению энерговыделения в активной зоне.

– Изучение пусковых режимов реакторной установки. Приобретение базовых знаний по технологии пуска и решения ряда практических задач по пуску энергоблока после ликвидации последствий аварийной ситуации.

– Изучение пространственной неустойчивости нейтронного поля в активной зоне реактора. Изучение причин возникновения аксиальных ксеноновых колебаний локальной мощности в активной зоне реакторов ВВЭР-1000 и механизмов их подавления на практике эксплуатации реакторов ВВЭР-1000. Решение задач по нахождению оптимального алгоритма подавления колебаний.

– Изучение нейтронно-физических характеристик органов управления, особенностей их измерения на АЭС с реактором ВВЭР-1000, сопоставление измеренных по БИК характеристик с расчетными данными. Исследование причин рассогласования измеренной эффективности групп ОР СУЗ с расчетной эффективностью и определение методов устранения этого рассогласования.

– Изучение основных свойств самозащитенности активной зоны реактора ВВЭР-1000 (1200): температурного и плотностного коэффициентов реактивности. Определение основных параметров и факторов, определяющих величину данных коэффициентов реактивности.

– Изучение явления повторной критичности в реакторах ВВЭР-1000 и причин его возникновения. Изучение мер по устранению явления повторной критичности в проекте АЭС-2006. Расчет основных параметров, характеризующих явление повторной критичности и последствий данного явления в реакторах ВВЭР.

– Изучение основных характеристик топливного цикла в реакторах ВВЭР-1000. Исследование зависимости этих характеристик от базового обогащения топлива подпитки по урану-235. Расчетное обоснование экономических показателей и показателей технической безопасности выбранного топливного цикла. Сопоставление показателей топливных циклов, реализованных с использованием различных схем перегрузок топлива.

– Изучение явления кризиса теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ в активной зоне реактора ВВЭР-1000 (1200). Изучение причин возникновения кризиса теплоотдачи и мер по уменьшению последствий данного явления на состоянии основных защитных барьеров реактора. Моделирование и анализ ряда аварий, приводящих к данному явлению, включая аварию на АЭС «Three Mile Island» с расплавлением топлива в активной зоне.

Для каждого из указанных выше тематических направлений сформировано одно или несколько учебных занятий. Разработано методическое обеспечение лабораторного практикума с описанием учебных занятий и задач, входящих в состав каждого занятия, инструкций по проведению занятий и обработки результатов их выполнения.

Использование учебных лабораторий, оснащенных комплексной моделью ЯЭУ, является эффективным средством решения задач сохранения и развития ядерных знаний, что является актуальной задачей международного ядерного сообщества. С этой целью МАГАТЭ регулярно проводит технические совещания и семинары, в том числе направленные на распространение имеющейся практики создания и использования подобных лабораторий. На ряде таких совещаний и семинарах был представлен опыт НИЯУ МИФИ в данном направлении. Так, в период с 2010 г. по настоящее время опыт НИЯУ МИФИ был представлен на следующих технических совещаниях, семинарах и обучающих курсах:

– Семинар МАГАТЭ «Применение компьютерных тренажеров АЭС для подготовки специалистов в высшей школе», БГУ, Минск, Беларусь, 24 – 28 мая 2010.

– IAEA Technical Meeting «On the Use of Nuclear Facilities and Simulators as Effective Tools for Education and Preserving Knowledge», Nuclear Training Centre of Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia, June 21 – 24, 2010.

– Курс лекций и лабораторных работ «Моделирование физических процессов в оборудовании АЭС», Физический факультет, БГУ. Минск, Беларусь, Ноябрь – Декабрь 2010.

– Техническое совещание МАГАТЭ «Разработка технических требований для учебных лабораторий «Реакторная физика, управление и безопасная эксплуатация ЯЭУ» для инженерно-физических специальностей технических университетов» для Армении, Беларуси, Украины. Вена, МАГАТЭ, Апрель 2011 г.

– IAEA Technical Meeting to «Promote the Awareness and the Use of Nuclear Facilities and Related Simulators as Effective Tools for Education and Research and for Capacity Building»,

Gesellschaft für Simulatorschulun gmbH (simulator training company), Essen, Germany, May 23 –25, 2011.

– IAEA Interregional Training Course on Operating Fundamentals of Pressurized Water Reactors with PC-Based Simulators. Nuclear Training & Education Center, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Republic of Korea, 3–7 June 2013.

– TECNATOM - IAEA Course on Physics and Technology of WCR Through the Use of PC-Based Simulators. TECNATOM, Madrid, Spain, 4–15 November 2013.

– Научно-технический семинар НИЯУ МИФИ – МАГАТЭ «Роль учебных лабораторий с использованием компьютерных систем в ядерно-инженерных образовательных программах университетов». НИЯУ МИФИ, Москва, Россия, 12 – 15 ноября 2013.

– IAEA Technical Meeting on «Effective Utilization of Nuclear Power Plant Simulators as Introductory Educational Tools», IAEA, Vienna, Austria, 19 – 22 May 2014.

– IAEA Consultancy Meeting on «Optimal Integration of NPP Simulators for Educational and Training Centers», IAEA Vienna, Austria, 20–22 October 2014.