

## МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНО-ТРЕНАЖЕРНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ДИСЦИПЛИН

**О.Л. Ташлыков\*, С.Е. Щеклеин\*, Г.П. Титов\*, Д.А. Носов\*, А.М. Тучков\*\***

\* *Уральский федеральный университет, 620002, Екатеринбург, ул.Мира, 19.*

\*\* *Белоярская АЭС, г. Заречный*

**Р**

Рассмотрено практическое использование программно-тренажерных средств при подготовке специалистов для атомной энергетики и их роль в формировании у выпускника профессиональных и профессионально-специализированных компетенций.

Кафедра «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ имеет специальную учебно-материальную базу по подготовке специалистов для АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. В учебном процессе активно используются программно-тренажерные средства (расчетные программы ГЕФЕСТ, Joker, Syntes, аналитический тренажер БН-800 и другие). При проведении научно-исследовательских работ студенты используют различные системы автоматизированного моделирования. В статье рассмотрены структура и элементы тренажерного комплекса БН-800, обеспечивающего тренировки по управлению технологическими процессами реакторного, турбинного отделений энергоблока. Описаны способы управления технологическими процессами, средства контроля и визуализации протекания процессов в реакторе и системах АЭС. Приведено описание математических моделей, с помощью которых осуществляется моделирование и имитация в реальном времени нейтронно-физических, теплофизических и теплогидравлических процессов в схеме энергоблока.

Рассмотрено использование аналитического тренажера на примере выполнения лабораторной работы «Маневрирование мощностью реакторной установки БН-800», в которой изучаются режимы управления мощностью реакторной установки (РУ) в диапазоне 100 – 80 – 100% от номинальной.

**Ключевые слова:** ядерная энергетика, ядерная энергетическая система, реактор на быстрых нейтронах, подготовка персонала, аналитический тренажер.

### ВВЕДЕНИЕ

Перспективная крупномасштабная ядерная энергетика должна обладать гарантированной безопасностью, экономической устойчивостью и конкурентоспособностью, отсутствием ограничений по сырьевой базе на длительный период времени, экологической устойчивостью (малоотходностью). Этим условиям могут удовлетворить ядерные энергетические системы (ЯЭС) с реакторами-размножителями на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем [1].

© *О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин, Г.П. Титов, Д.А. Носов, А.М. Тучков, 2016*

Россия обладает многолетним опытом в области сооружения и эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, базой развития которых является Белоярская АЭС. Более 36-ти лет успешно эксплуатируется БН-600, осуществляется этап освоения номинальной мощности энергоблока с реактором БН-800. В настоящее время разрабатывается проект реактора БН-1200, который может быть использован в ЯЭС четвертого поколения с замыканием ЯТЦ [2].

Одним из основных условий успешной реализации данного инновационного направления развития атомной энергетики является подготовка высококвалифицированных специалистов по эксплуатации и обслуживанию систем и оборудования энергоблоков АЭС с реакторами на быстрых нейтронах [3]. При этом активное использование программно-тренажерных средств является обязательной частью образовательного процесса, позволяющей эффективно влиять на качество подготовки специалистов.

### **МЕТОДЫ И СРЕДСТВА**

Кафедра «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» была основана в 1961 г. в Уральском политехническом институте (ныне Уральский федеральный университет) в связи со строительством Белоярской АЭС. Сооружение энергоблока №3 с реактором БН-600 актуализировало необходимость специализации подготовки выпускников кафедры для эксплуатации быстрых реакторов. Уникальность технологии быстрых реакторов потребовала специфического подхода к подготовке специалистов и специальной материально-технической базы, создание которой проходило при активной поддержке руководства Белоярской АЭС и концерна Росэнергоатом [4, 5].

Многолетний опыт по подготовке специалистов для атомной энергетики определил необходимость активного применения программно-тренажерных средств обучения. На кафедре «Атомная энергетика» УрФУ создан комплекс специфических программно-тренажерных средств, включающий в себя

- аналитические симуляторы ТОМАС-1А и ТОМАС-2, позволяющие моделировать нормальные, переходные и аварийные режимы работы энергоблоков с ВВЭР-1000 и РБМК-1000 соответственно [6];

- расчетный код Корсар, предназначенный для расчетных анализов нестационарных процессов в контурах АЭС с ВВЭР в стационарных, переходных и аварийных режимах;

- комплекс программ ГЕФЕСТ для нейтронно-физических расчетов реактора типа БН в многогрупповом диффузионном приближении в трехмерной гексагональной геометрии;

- комплекс программ Joker для расчетного обоснования безопасной эксплуатации АЭС с реактором БН-600;

- программный комплекс Syntes для нейтронно-физического и теплогидравлического расчетов быстрых реакторов;

- аналитический тренажер БН-800.

Помимо этого для повышения эффективности подготовки специалистов активно реализуется принцип «Обучение через науку», подразумевающий организацию образовательного процесса на базе решения реальных задач атомной энергетики.

При выполнении научно-исследовательских работ, дипломных проектов на кафедре «Атомные станции и ВИЭ» используются различные стандартные системы автоматизированного моделирования [7, 8]. В проводимых совместно со специалистами АО «Институт реакторных материалов» с 2011 г. расчетно-экспериментальных исследованиях по оптимизации состава гомогенных радиационно-защитных мате-

риалов используются высокопрецизионные расчетные коды, реализующие метод Монте-Карло [9, 10]. При реализации сложных математических задач (например, использование метода динамического программирования для маршрутной оптимизации работ в нестационарных радиационных полях [11]) привлекаются специалисты и вычислительные ресурсы Института механики и математики УрО РАН [12].

Учитывая важность тренажерной подготовки специалистов для обеспечения безопасности АЭС, в 2008 г. кафедра приобрела аналитический тренажер БН-800, разработанный ЭНИМЦ «Моделирующие системы» (г. Обнинск), позволяющий моделировать различные эксплуатационные режимы энергоблока, в том числе переходные и аварийные (рис. 1).



Рис. 1. Занятия на аналитическом тренажере БН-800

Особую значимость тренажер имел для опережающей подготовки эксплуатационного персонала строящегося энергоблока, позволяющей подготовить необходимое количество специалистов к его пуску. В дальнейшем тренажер будет использоваться для текущей подготовки, переподготовки и повышения квалификации специалистов для БН-800 [13].

Тренажерный комплекс состоит из пяти рабочих станций, двух серверов (основного и резервного), принтера и сетевого коммутатора. Все технические средства тренажера связаны локальной сетью. Каждая рабочая станция включает в себя два графических монитора, клавиатуру, мышь.

Одна станция является рабочим местом инструктора, остальные – автоматизированными рабочими местами оператора. Рабочая станция инструктора отличается от других наличием специального инструкторского формата и специальной панели управления тренажером. С рабочего места инструктора осуществляются запуск модели и управление всей работой на тренажере, включая задание отказов и воздействия «удаленного» управления (по месту).

Станция оператора имитирует автоматизированное рабочее место (АРМ) оперативного персонала энергоблока. Каждая из них может служить рабочим местом операторов по управлению реактором, парогенераторами или турбинной установкой.

Вся необходимая информация о состоянии технических средств блока представ-

ляется оператору на экранах мониторов. Управление техническими средствами и технологическим процессом производится при помощи мыши. Все механизмы (насосы, регуляторы, арматура и т.д.) управляются при помощи пиктограмм и кнопок, расположенных на всплывающих окнах управления.

Необходимая информация (значения технологических параметров в цифровой форме и состояние насосов, регуляторов, арматуры и т.д.) представляется оператору на графических форматах, вызываемых на экран при помощи системы навигации. С этих форматов оператор управляет техническими средствами блока. Для наблюдения и изучения развития характерных процессов используются графики (рис. 2).

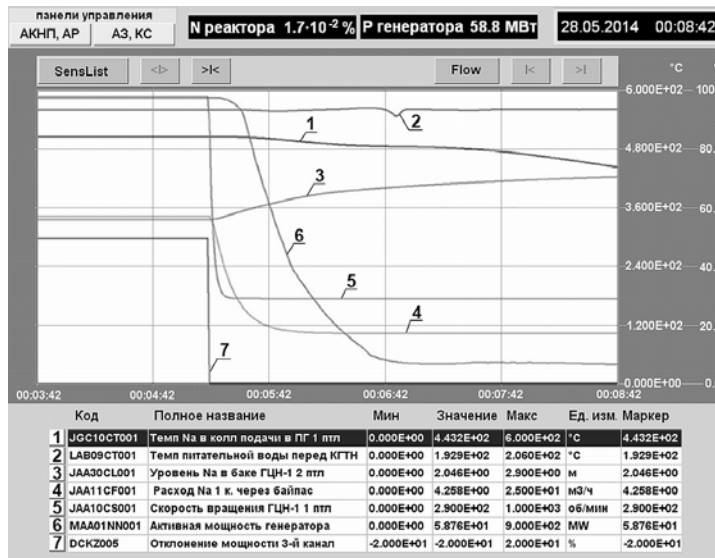


Рис. 2. Изменение параметров при срабатывании быстродействующей аварийной защиты

В нижней части экрана расположена панель навигации, на которой размещены кнопки системы навигации, кнопки-сигнализаторы и кнопки-переходы. На верхней панели расположены сенсоры наиболее важных технологических параметров энергоблока, две кнопки вызова форматов системы управления и защиты реактора (СУЗ). Оператор может вызвать обобщенный формат, формат сигналов аварийной, предупредительной и технологической сигнализации, предыдущий формат и т.п. на любой монитор тренажера.

Формат «Сигнализация» предназначен для своевременной регистрации и оповещения оператора о любых неисправностях и отклонениях в работе блока. Все сигналы по степени важности разбиты на три уровня: аварийная, предупредительная и технологическая сигнализации. Появление сигналов первого и второго уровней сопровождается звуковыми сигналами, которые отключаются автоматически через 3 – 5 с.

Ключевым графическим форматом является обобщенный формат (рис. 3), с которого осуществляется доступ ко всем остальным графическим форматам. На экране обобщенного формата можно ознакомиться со схемой энергоблока [14], отслеживать основные параметры (давление и температура) в ключевых точках, состояние насосов и положение задвижек.

Моделирование технологических процессов в схеме энергоблока осуществляется с помощью комплекса моделей (первого, второго контуров, турбоустановки и т.д.). Тренажер имеет полные и точные математические модели, имитирую-

щие в реальном времени все нейтронно-физические, теплофизические и тепло-гидравлические процессы энергоблока, а также всю логику систем управления и автоматики.

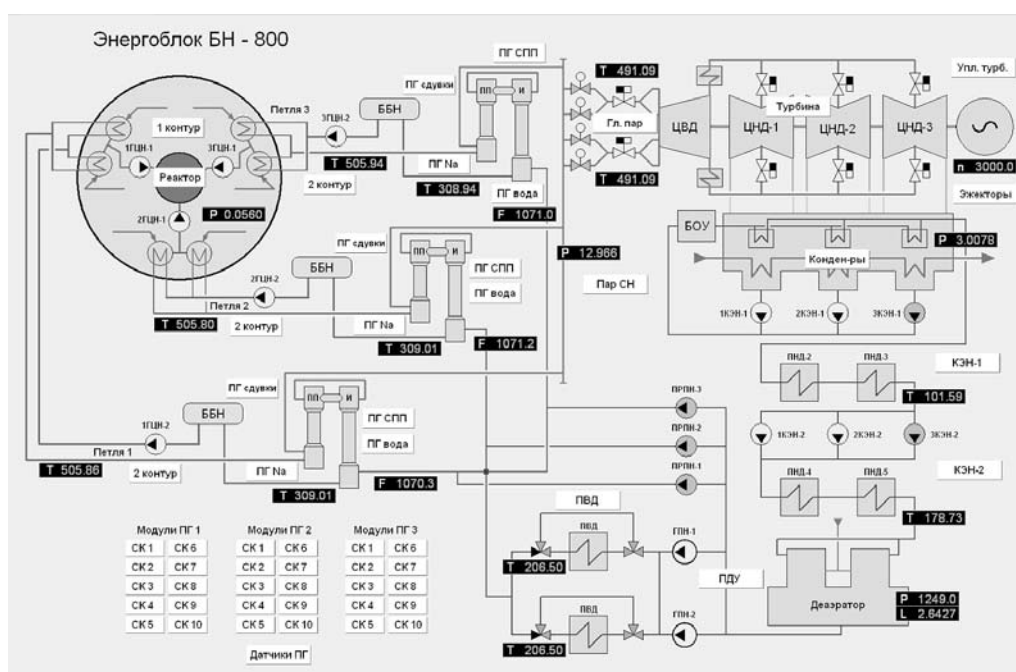


Рис.3. Обобщенный графический формат

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Аналитический тренажер БН-800 был разработан в 2008 г. на основании технических условий на его изготовление и проектных технологических параметров энергоблока с реактором БН-800. В 2008 – 2015 гг. совместно со специалистами Белоярской АЭС на кафедре «Атомные станции и ВИЭ» были разработаны методические указания по проведению комплекса лабораторных работ по основным направлениям подготовки оперативного персонала. Первая лабораторная работа посвящена получению начальных навыков работы на тренажере.

Тренажер обеспечивает

- первоначальную подготовку, переподготовку и поддержание квалификации оперативного персонала и персонала инженерной поддержки АЭС;
- тренировки по управлению технологическим процессом реакторного, турбинного и электротехнического отделений энергоблока и контроль за его состоянием в нормальных и аварийных режимах;
- моделирование переходных процессов и поиск корневых причин аварийных ситуаций, имевших место на АЭС;
- проверки правильности действий персонала в переходных режимах, описанных в эксплуатационных инструкциях;
- формирование у персонала более глубокого понимания физических процессов, протекающих в управляемом объекте;
- верификацию симптомно-ориентированных инструкций;
- разработку учебно-методического обеспечения.

В настоящее время совместно со специалистами Белоярской АЭС разрабатываются методические указания по выполнению следующих лабораторных

работ на тренажере.

1. Перекомпенсация компенсирующих органов СУЗ (имитация работы регулирующего стержня в режиме до перекомпенсации; последовательное извлечение на заданную высоту всех органов компенсации реактивности; поддержание мощности реактора на заданном уровне; перевод регулирующего стержня в автоматический режим).
2. Метод относительного взвешивания (метод сравнения) (определение относительной эффективности всех или группы перемещаемых стержней СУЗ в миллиметрах ответного перемещения регулирующего стержня; поддержание мощности реактора на заданном уровне).
3. Отключение одной из теплоотводящей петель (снижение частоты вращения одного ГЦН первого контура ниже уставки; срабатывание сигнала отключения петли; ввод в активную зону регулирующих стержней; перевод всех ГЦН на пониженную частоту вращения; поддержание мощности реактора на заданном уровне).
4. Моделирование нестационарного режима, связанного с несанкционированным извлечением стержней СУЗ (компенсирующих и регулирующих, с максимальной скоростью).

Рассмотрим учебно-практическое применение аналитического тренажера БН-800 на примере лабораторной работы, посвященной маневрированию мощностью установки.

Целью работы является изучение режима маневрирования мощностью реакторной установки (РУ) БН-800. В реальном времени необходимо снизить мощность РУ до 80%, а затем поднять ее до номинального уровня с шагом в 5%.

Ход выполнения работы включает в себя проведение подготовительных перед снижением мощности реактора операций, заключающихся в разгрузке ПВД 1, 2 по пару до снижения температуры питательной воды после ПВД с 206 до 190 – 195°C. Разгрузка ПВД по пару производится поочередным прикрытием задвижек подачи пара отбора от ТГ. Скорость снижения температуры питательной воды при этом не должна превышать 30°C/ч.

Выполнение работы осуществляется по единому алгоритму, включающему в себя изменение мощности реактора с помощью автоматического регулятора нейтронной мощности АР-1 или АР-2 путем воздействия на  $N_{зад}$  1АРМ или  $N_{зад}$  2АРМ (рис. 4).

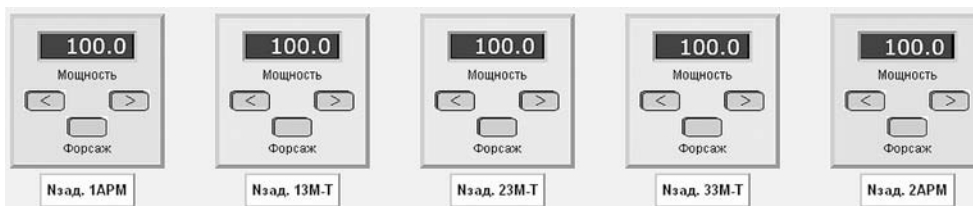


Рис. 4. Автоматические регуляторы нейтронной мощности АР-1 и АР-2

Изменение мощности реактора производится ступенями по 5% с заданной скоростью. При этом регулятору давления пара в ГПК задается уставка на поддержание давления острого пара в соответствии с указаниями инструкции.

В процессе изменения мощности реактора на форматах первого и второго контуров производится коррекция оборотов ГЦН первого и второго контуров до требуемых значений (рис. 5). При изменении мощности реактора на 5%  $N_{ном}$  на формате АКНП делается выдержка для стабилизации теплотехнических параметров (температуры натрия на входе-выходе промежуточного теплообменника, парогенератора, острого пара и т.д.) и производится запись их значений с проверкой соответ-

ствия заданным (регламентированным) на данном этапе.

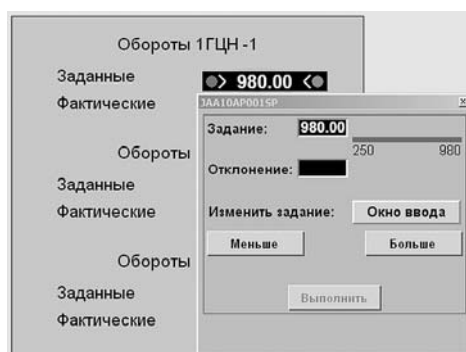


Рис. 5. Окно управления оборотами 1ГЦН-1

На последнем этапе работы при достижении 100%  $N_{\text{ном}}$  поочередным открытием задвижек подачи пара отбора от турбины производится подключение ПВД 1, 2 по пару до подъема температуры питательной воды после ПВД до номинального значения в 206 °С на панели управления ПВД.

Лабораторная работа дает представление о том, какое количество параметров необходимо в реальном времени отслеживать и своевременно регулировать в соответствии с технологическим регламентом, насколько многофакторной является работа оператора на реальной АЭС.

Тренажер позволяет решать ряд важных задач, повышающих качество подготовки специалистов для атомной энергетики за счет проведения индивидуальных и групповых занятий под руководством преподавателя; отработку интеллектуальных и моторных навыков управления оборудованием и слаженности действий операторов при выполнении работ в сложных технологических процессах и т.д.

## ВЫВОДЫ

1. Использование программно-тренажерных средств при обучении студентов кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» повышает качество подготовки специалистов для атомной энергетики.
2. Обучение на тренажерах помогает оператору освоить безошибочное выполнение алгоритмов управления, приемы анализа информации, понимать хронологию событий.
3. Обучение на тренажере имеет особую значимость для опережающей подготовки эксплуатационного персонала головного энергоблока, позволяющей подготовить необходимое количество специалистов к его пуску.

## Литература

1. Tashlykov O., Shcheklein S., Sesekin A., Chentsov A., Nosov Y., Smyshlaeva O. Ecological features of fast reactor nuclear power plants (NPPs) at all stages of their life cycle. // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2014. – Vol. 190. – No. 2. – PP. 907-918.
2. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Экологическое прогнозирование в ядерной энергетике XXI века // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2015. – № 8-9 (172-173). – С. 50-58
3. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Карпенко А.И., Бельтюков А.И., Тучков А.М. Опыт подготовки специалистов для инновационной ядерной энергетики / XIV Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров»: тезисы докладов. Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ. – 2015. – С. 54-57.
4. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Новые технологии подготовки специалистов для инновационного энергоблока АЭС с реактором БН-800 / Новые образовательные технологии в

вузе: сб. материалов VII Международной научно-методической конференции, 8 – 10 февраля 2010 г. В 2-х частях. Часть 2. Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2010. С.401-406.

5. Щеклеин С.Е., Ташлыков О.Л., Велькин В.И., Шастин А.Г., Дементьев В.Н., Маркелов Н.И., Сорокин Ю.И. Опыт сотрудничества концерна «Росэнергоатом» и Уральского государственного технического университета в области подготовки специалистов для технического обслуживания и ремонта оборудования АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2004. – №3. – С.121-129.

6. Ташлыков О.Л., Носов Д.А. Использование симуляторов «ТОМАС-1», «ТОМАС-2» для моделирования переходных режимов, вызванных нарушениями в ремонте оборудования АЭС / XI Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров – 2009»: тезисы докладов, Обнинск, 29 сентября – 2 октября 2009 г. в 2 – т. Т. 2. – Обнинск: НОУ «ЦИПК». – 2009. – С. 67-68.

7. Ташлыков О.Л., Наумов А.А., Щеклеин С.Е. Моделирование процесса замораживания натрия в трубопроводах с целью оптимизации ремонта реакторных установок на быстрых нейтронах // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – № 2. – С. 21-26.

8. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Климова В.А., Наумов А.А. Моделирование виртуальных радиационных полей // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2011. – №4. – С.24-34.

9. Russkikh I.M., Seleznev E.N., Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Experimental and Theoretical Study of Organometallic Radiation-Protective Materials Adapted to Radiation Sources with a Complex Isotopic Composition // Physics of Atomic Nuclei. – 2015. – Vol. 78. – No. 12. – PP. 1451-1456.

10. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Лукьяненко В.Ю., Михайлова А.Ф., Русских И.М., Селезнев Е.Н., Козлов А.В. Оптимизация состава радиационной защиты // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2015. – № 4. – С. 36-42.

11. Балущин Ф.А., Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Чеблоков И.Б., Щеклеин С.Е., Ченцов А.Г. Использование метода динамического программирования для оптимизации демонтажа оборудования энергоблоков АЭС, выводимых из эксплуатации, с целью минимизации облучения // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 4. – С. 169-176.

12. Григорьев А.М., Иванко Е.Е., Ченцов А.Г., Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Решение задач маршрутной оптимизации применительно к радиационно опасным объектам с использованием суперкомпьютера «Уран» В книге: Безопасность АЭС и подготовка кадров. – 2011. – С. 103-105.

13. Щеклеин С.Е., Ташлыков О.Л., Титов Г.П., Борисова Е.В., Носов Д.А. Использование компьютерных технологий в УГТУ-УПИ при подготовке специалистов для атомной энергетики // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2009. – №9. – С. 4-16.

14. Бельтюков А.И., Карпенко А.И., Полуяктов С.А., Ташлыков О.Л., Титов Г.П., Тучков А.М., Щеклеин С.Е. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. В 2 ч. Ч. 1 / Под общ. ред. С.Е. Щеклеина, О.Л. Ташлыкова. – Екатеринбург: УрФУ. – 2013. – 548 с.

Поступила в редакцию 04.05.2016 г.

#### Авторы

Ташлыков Олег Леонидович, доцент, канд. техн. наук

E-mail: otashlykov@list.ru

Щеклеин Сергей Евгеньевич, зав. кафедрой, профессор, доктор техн. наук

E-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

Титов Геннадий Павлович, научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук

Носов Даниил Антонович, зав. лабораторией

Тучков Андрей Михайлович, зам. главного инженера Белоярской АЭС, канд. техн. наук



UDC 621.039

## METHODS FOR USING COMPUTER TRAINING FACILITIES IN STUDIES OF SPECIAL DISCIPLINES

Tashlykov O.L.\*, Shcheklein S.E.\*, Titov G.P.\*, Nosov D.A.\*, Tuchkov A.M.\*\*

\* Ural Federal University. 19 Mira ave., Yekaterinburg, 620002, Russia

\*\* Beloyarskaya NPP

### ABSTRACT

The paper considers the practical use of computer training facilities in training of personnel for nuclear power industry and their role in forming professional and special professional competences of graduating students.

The Ural Federal University's Department of Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources possesses special training facilities for training of personnel for nuclear power plants with fast neutron reactors. Software tools and simulators, such as GEFEST, Joker and Syntes codes, a BN-800 analytical simulator and others, are heavily involved in the training process. A variety of computer-aided simulation systems is used by students for research projects.

The paper considers the structure and the components of the BN-800 training system used for training in control of the power unit's reactor and turbine department processes. It also describes process control techniques and the reactor and NPP process control and visualization tools. Mathematical models are described, which are used for real-time modeling and simulation of the power unit's neutronic, thermal-physical and thermal-hydraulic processes.

The use of the analytical simulator is illustrated by a laboratory research project entitled «BN-800 Reactor Power Maneuvering», which investigates the reactor facility power control modes in a power range of 100 – 80 – 100% of the rated power.

**Key words:** nuclear power industry, nuclear power system, fast neutron reactor, personnel training, analytical simulator.

### REFERENCES

1. Tashlykov O., Shcheklein S., Sesekin A., Chentsov A., Nosov Y., Smyshlaeva O. Ecological features of fast reactor nuclear power plants (NPPs) at all stages of their life cycle. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2014, v. 190, no. 2, pp. 907-918.
2. Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Ekologicheskoye prognozirovaniye v yadernoy energetike XXI veka [Ecological forecasting in the nuclear power industry of the 21<sup>st</sup> century]. International scientific journal *Alternativnaya energetika i ekologiya*. 2015, no. 8-9 (172-173), pp. 50-58 (in Russian).
3. Tashlykov O.L., Shcheklein S.E., Karpenko A.I., Bel'tukov A.I., Tuchkov A.M. Opyt podgotovki spetsialistov dlya innovatsionnoy yadernoy energetiki [Experience in training of personnel for innovative nuclear power]. XIV<sup>th</sup> Mezhdunarodnaya konferentsiya «Bezopasnost AES i podgotovka kadrov» [The 14<sup>th</sup> Int. Conf. «NPP Safety and Personnel Training»]. Obninsk, 2015, pp. 54-57 (in Russian).
4. Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Novye tekhnologii podgotovki spetsialistov dlya innovatsionnogo energobloka AES s reaktorom BN-800 [New technologies for training of personnel for an innovative NPP unit with a BN-800 reactor]. Novye obrazovatelnye tekhnologii v vuze: sbornik materialov nauchno-metodicheskoy konferentsii [The 7<sup>th</sup> Int. Scient. Conf. «New Educational Technologies in Higher School»], 8-10 February 2010. In 2 parts. Part 2. Yekaterinburg: SEI HPE Ural State Technical University. 2010, pp. 401-406 (in Russian).
5. Shcheklein S.E., Tashlykov O.L., Velkin V.I., Shastin A.G., Dementev V.N., Markelov N.I., Sorokin Y.I. Opyt sotrudnichestva kontserna «Rosenergoatom» i Uralskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta v oblasti podgotovki spetsialistov dlya tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya AES [Experience of cooperation of Rosenergoatom

Concern and the Ural State Technical University in the field of personnel training for the maintenance and repair of the NPP equipment]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2004, no. 3, pp. 121-129 (in Russian).

6. Tashlykov O.L., Nosov D.A. Ispolzovaniye simulatorov TOMAS-1 and TOMAS-2 dlya modelirovaniya perekhodnykh rezhimov, vyzvannykh narusheniyami v remonte oborudovaniya AES [Use of the TOMAS-1 and TOMAS-2 simulators to model transients caused by failures in repair of the NPP equipment]. XI Mezhdunarodnaya konferentsiya «Bezopasnost AES i podgotovka kadrov – 2009» [The 11<sup>th</sup> Int. Conf. «NPP Safety and Personnel Training – 2009»]. Obninsk, 2009, v. 2, pp. 67-68 (in Russian).

7. Tashlykov O.L., Naumov A.A., Shcheklein S.E. Modelirovaniy processa zamorazhivaniya natriya v truboprovodakh s tselyu optimizatsii remonta reaktornykh ustanovok na bystrykh neytronakh [Modeling of the sodium freezing process in pipelines for the purpose of optimizing the repair of fast neutron reactor units]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2013, no. 2, pp. 21-26 (in Russian).

8. Tashlykov O.L., Shcheklein S.E., Klimova V.A., Naumov A.A. Modelirovaniye virtualnykh radiatsionnykh poley [Modeling of virtual radiation fields]. *Distantionnoye i virtualnoye obucheniye*. 2011, no. 4, pp. 24-34 (in Russian).

9. Russkikh I.M., Seleznev E.N., Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Experimental and Theoretical Study of Organometallic Radiation-Protective Materials Adapted to Radiation Sources with a Complex Isotopic Composition. *Physics of Atomic Nuclei*. 2015, v. 78, no. 12, pp. 1451-1456.

10. Tashlykov O.L., Shcheklein S.E., Lukyanenko V.Y., Mikhailova A.F., Russkikh I.M., Seleznev E.N., Kozlov A.V. Optimizatsiya sostava radiatsionnoy zashchity [Optimization of the radiation protection composition]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2015, no 4, pp. 36-42 (in Russian).

11. Balushkin F.A., Sesekin A.N., Tashlykov O.L., Cheblokov I.B., Shcheklein S.E., Chencov A.G. Ispolzovaniye metoda dinamicheskogo programmirovaniya dlya optimizatsii demontazha oborudovaniya energoblokov AES, vyvodimykh iz ekspluatatsii, s tselyu minimizatsii oblucheniya [Using a dynamic programming method to optimize disassembly of the decommissioned NPP equipment for exposure minimization]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2009, No 4, pp. 169-176 (in Russian).

12. Grigoriev A.M., Ivanko E.E., Chencov A.G., Sesekin A.N., Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Resheniye zadach marshrutnoy optimizatsii primenitelno k radiatsionno opasnym obyektam s ispolzovaniyem superkomp'yutera «Uran» [Solution of route optimization problems as applied to radiation hazardous installations using the Uran supercomputer]. XII<sup>th</sup> Mezhdunarodnaya konferentsiya «Bezopasnost AES i podgotovka kadrov – 2011» [The 12<sup>th</sup> Int. Conf. «NPP Safety and Personnel Training – 2011»]. Obninsk, 2011, pp. 103-105 (in Russian).

13. Shcheklein S.E., Tashlykov O.L., Titov G.P., Borisova E.V., Nosov D.A. Ispolzovaniye kompiuternykh tekhnologiy v UGTU-UPI pri podgotovke spetsialistov dlya atomnoy energetiki [Use of computer technologies at the Ural State Technical University in training of personnel for nuclear power industry]. *Distantionnoye i virtualnoye obucheniye*, 2009, no 9, pp. 4-16 (in Russian).

14. Bel'tukov A.I., Karpenko A.I., Poluyaktov S.A., Tashlykov O.L., Titov G.P., Tuchkov A.M., Shcheklein S.E. Atomnye elektrostantsii s reaktorami na bystrykh neytronakh s natriyevym teplonositelem [Nuclear power plants with fast neutron sodium cooled reactors]. In 2 parts, part 1. Ed. S.Ye. Shcheklein, O.L. Tashlykov. Yekaterinburg. Ural Federal University Publ., 2013, v. 1, 548 p. (in Russian).

#### Authors

Tashlykov Oleg Leonidovich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: otashlykov@list.ru

Shcheklein Sergej Ewgen'evich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

Titov Gennadij Pavlovich, Research Scientist, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

Nosov Daniil Antonovich, Head of Laboratory

Tuchkov Andrej Mihajlovich, Deputy Chief Engineer Beloyarsk NPP