

## БФС – ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ

**В.Г. Двухшерстнов, А.М. Жуков, Д.А. Клинов,**

**И.П. Матвеев, Г.М. Пшакин**

*АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»*

*249033 Калужская обл., Обнинск, пл. Бондаренко, 1*



Комплекс больших физических стендов (БФС) в настоящее время является уникальным (и, пожалуй, единственным в мире) экспериментальным инструментом для полномасштабного моделирования ядерных реакторов различного типа. Созданный в 60-х годах прошлого века он остается эффективным экспериментальным инструментом, позволяющим с высокой точностью предсказать основные физические параметры реакторов на быстрых нейтронах. Собранные на БФС специальные критические сборки – бенчмарки – позволили провести уточнение ядерных констант, методик измерений и методов расчета, необходимых при проектировании реакторов на быстрых нейтронах.

Начиная с 1990-х гг. критические стенды БФС-1 и БФС-2 активно использовались в международном сотрудничестве, в рамках которого выполнялись совместные работы с учеными Франции, США, Японии, КНР, Индии, Республики Корея по экспериментам в обоснование разрабатываемых в этих странах реакторных установок и по решению ряда смежных проблем.

Уникальное количество различных ядерных материалов, имеющих на БФС и используемых для моделирования, требует особого внимания к обеспечению их сохранности. Современные методы, технологии и оборудование применяются для обеспечения эффективной работы систем учета, контроля и физической защиты этих ядерных материалов. Оборудование стендов постоянно обновлялось, модернизировалось и продолжает совершенствоваться в процессе эксплуатации. Новые задачи, встающие при разработке стратегии замкнутого топливного цикла ядерной энергетики России, потребовали дальнейшего развития и модернизации стендов, приобретения новых ядерных материалов и изготовления дополнительного количества к уже имеющимся.

**Ключевые слова:** критическая сборка, моделирование активных зон, реакторы на быстрых нейтронах, учет и контроль ядерных материалов, физическая защита, эффекты реактивности, эффективность органов управления, объемное распределение мощности, натриевый пустотный эффект реактивности.

### ВВЕДЕНИЕ

Первые экспериментальные установки, созданные в середине 1950-х гг. (реакторы БР-1 и БР-2), позволили проверить на эксперименте базовые принципы реакторов-размножителей (например, коэффициент  $\alpha = \sigma_c / \sigma_f$  для  $^{239}\text{Pu}$ ) [1]. После принятия решения о строительстве энергетических реакторов на быстрых нейтронах Правительством СССР (в частности, реактора БН-350) необходимо было создать эк-

© В.Г. Двухшерстнов, А.М. Жуков, Д.А. Клинов, И.П. Матвеев, Г.М. Пшакин, 2017

спериментальную установку (критический стенд) для проверки физических параметров будущих реакторов. Строительство такой установки было начато в конце 1950-х гг. в Физико-энергетическом институте в Обнинске, и 19 июня 1961 г. первый стенд БФС-1 вступил в строй [2].

Задачи полномасштабного моделирования потребовали создания стенда больших размеров. В 1967 г. ученик и заместитель А.И. Лейпунского В.В. Орлов поручил Ю.А. Казанскому заниматься быстрыми реакторами, который становится руководителем комплекса «лаборатория 68 – стенд БФС». Вместе с ним пришли уже заявившие о себе молодые сотрудники А.Т. Баков, С.П. Белов, В.Г. Двухшерстнов, В.А. Дулин, А.В. Звонарев, И.П. Матвеев, В.К. Можаяев, развернувшие серию экспериментальных работ. Нельзя не вспомнить Ф.И. Украинцева, В.П. Зиновьева, В.И. Вьюнникова, Ю.Я. Стависского с их огромным вкладом в деятельность творческого коллектива. Крупнейший в мире стенд БФС-2 был пущен 30 сентября 1969 г. Стенд БФС-2 и комплекс БФС-1 – микротрон (реакторная спектрометрия) были представлены на экспозициях ВДНХ СССР.

К настоящему времени на стендах БФС в общей сложности собрано более 100 критических сборок. Оценивая работу БФС за более чем полувековой срок, можно отметить три направления проведенных исследований:

- проектные и предпусковые исследования для проектируемых, строящихся и вводимых в эксплуатацию реакторов на быстрых нейтронах (ИБР-2, БОР-60, БН-350, БН-600, БН-800, БН-1600, БН-1200, МБИР, СВБР-100, БРЕСТ); программы исследований были сфокусированы на основных проектных параметрах реакторов – критичность, эффективность органов СУЗ, распределение мощности, пустотный эффект реактивности теплоносителя и др.;
- эксперименты на специальных моделях для проверки расчетных методов, ядерных констант и методик измерений (так называемые «бенчмарк-модели»);
- исследования (моделирование) по зарубежным заказам.

Каждое из этих направлений может быть отмечено как достигнутыми успехами, так и выявлением проблемных вопросов, требующих дальнейших экспериментов и расчетных исследований.

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ

Комплекс быстрых физических стендов, включающий в себя два критических стенда (БФС-1 и БФС-2), представляет собой уникальную экспериментальную базу для исследования физики быстрых реакторов, решения проблемы безопасности, оптимизации активных зон, обоснования замкнутого топливного цикла [2].

Стенд БФС-2 (рис. 1) имеет диаметр реакторного бака 5 м, в котором по треугольной решетке с шагом 51 мм располагаются трубы (диаметр 508 мм) для размещения блоков реакторных материалов. Высота труб – 3,2 м. К баку критической сборки примыкают два дополнительных объема, в одном из которых располагается перемещаемая графитовая колонна, а в другом – трубы так называемой металлической колонны для моделирования внутриреакторных хранилищ и внутрикорпусных защит. Размеры критического стенда БФС-2 позволяют создавать полномасштабные модели быстрых реакторов мощностью до 3000 МВт (эл.).

Стенд БФС-1 (рис. 2) имеет подобную конструкцию, но меньших размеров (диаметр реакторного бака – 2 м, высота труб – 2,2 м). К реакторному баку примыкают графитовая тепловая и металлическая колонны. Размеры стенда БФС-1 позволяют собирать полномасштабные модели быстрых реакторов мощностью до 1000 МВт (тепл.).

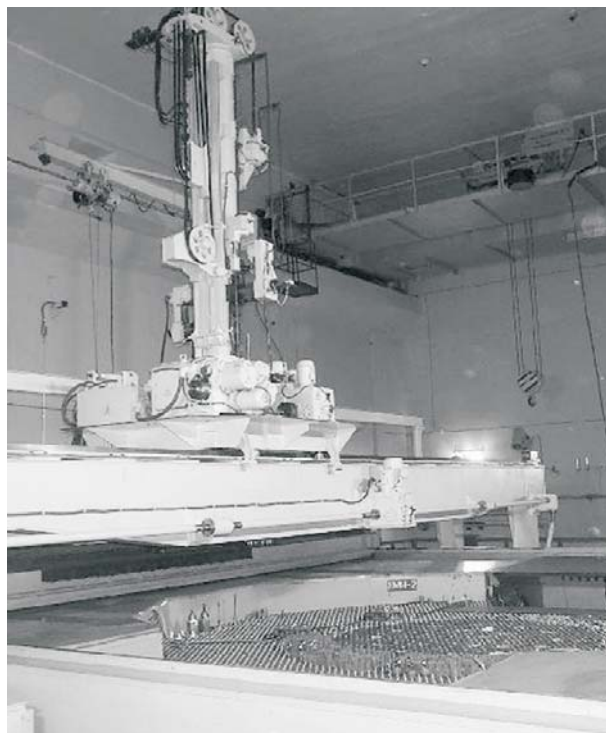


Рис. 1. Критический стенд БФС-2



Рис. 2. Критический стенд БФС-1

Стенды оснащены аппаратурой для измерения нейтронно-физических параметров и вспомогательными устройствами, среди которых

- многодетекторный цифровой реактиметр с программным обеспечением, позволяющим измерять реактивность в условиях сильного влияния пространственных эффектов в широком диапазоне реактивности;
- экспериментальное устройство, дистанционно управляемое из пультного помещения, с помощью которого обеспечиваются метод осцилляции, перемещение малогабаритных камер деления в межтрубных зазорах активной зоны, перемещение труб по баку критсборки, заполненных ядерными материалами;
- гамма-спектрометрическая аппаратура высокого энергетического разрешения на основе детекторов с особо чистым германием и низкого энергетического разрешения на основе сцинтилляционных детекторов;
- широкий набор ионизационных камер с различными слоями ядерных материалов и нейтронных счетчиков;
- набор активационных детекторов;
- набор образцов для измерений возмущения реактивности методом осцилляций, в том числе образцы с младшими актинидами;
- устройство разогрева образцов для измерения доплер-эффекта;
- созданный в шестидесятых годах прошлого века электронный ускоритель с энергией 30 МэВ, позволяющий детально измерять нейтронные спектры в диапазоне до ~ 200 кэВ методом времени пролета (на базе до 400 м), а также использовать импульсный нейтронный метод для измерений реакторных параметров;
- нейтронная спектрометрическая аппаратура на базе водородных и метановых пропорциональных счетчиков протонов отдачи, позволяющая измерять спектры нейтронов в области от нескольких килоэлектронвольт до 1,5 МэВ;
- нейтронная спектрометрическая аппаратура на базе детекторов с органическими сцинтилляторами, позволяющая измерять спектры нейтронов в области высоких энергий.

### **СПЕЦИФИКА ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ**

В соответствии с составом активных зон реакторов на быстрых нейтронах (топливные и конструкционные материалы, вид теплоносителя) на стендах БФС имеются материалы, набор которых позволяет с максимально возможной полнотой смоделировать состав активной зоны быстрого реактора. Оба стенда рассчитаны на использование одних и тех же материалов.

Набор материалов – металлический плутоний двух изотопных составов, двуокись и металлический уран с обогащением 36 и 90% по  $^{235}\text{U}$ , в большом количестве воспроизводящие материалы (торий и обедненный уран в виде металла, двуокиси и монокрида), значительные количества  $^{237}\text{Np}$  и образцов других минорных актинидов (МА), поглотители (карбид бора естественного изотопного состава и с обогащением 80% по изотопу  $^{10}\text{B}$ ), конструкционные материалы, блочки с натрием, свинцом, сплав свинец-висмут и др. – позволяет собирать как сложные полномасштабные модели быстрых реакторов, так и модели типа бенчмарк, эксперименты на которых проводятся для корректировки ядерных констант и совершенствования расчетных методов.

Все блочки имеют диаметр 47 мм, но различную высоту и массу имеющегося в них материала (рис. 3). Необходимо особо отметить, что значительному количеству делящихся материалов необходимо уделять повышенное внимание для обеспечения как ядерной безопасности, так и сохранности этих материалов.

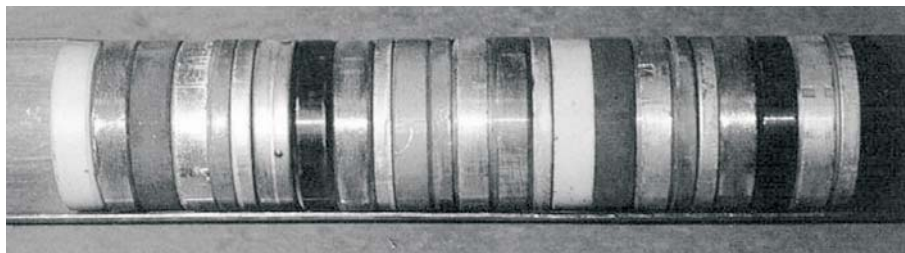


Рис. 3. Блочки различных реакторных материалов

В рамках программы по учету, контролю и физической защите ядерных материалов с 1995 г. по настоящее время проводится большая работа по совершенствованию обращения с ядерными материалами. Отработана и внедрена технология нанесения уникальной лазерной маркировки учетных единиц с ядерными делящимися материалами, позволяющая вести контроль учетных единиц непрерывно с использованием компьютерных технологий. На БФС подлежат учету более 100 000 учетных единиц (блочков) с ядерными делящимися материалами; такое количество создает значительные трудности для проведения физической инвентаризации в соответствии с требованиями Основных правил учета и контроля ядерных материалов [3]. Для сокращения времени на проведение физической инвентаризации ядерных материалов используется метод случайных выборок учетных единиц, объем которых сокращается за счет применения различных видов пломб и средств наблюдения.

В процессе технического перевооружения БФС получено значительное количество ядерных материалов для проведения исследований в рамках «новой технологической платформы», включая вопросы замыкания топливного цикла, исследования реакторов с теплоносителями из тяжелых металлов и на новых видах топлива и т.д.

### **СПЕЦИФИКА И ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕАКТОРОВ И СПЕЦИАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ**

За более чем полувековой срок работы критических стендов БФС специалистами ФЭИ накоплен уникальный опыт работ по их эксплуатации и проведению экспериментов [4 – 14]. Оценивая достигнутые результаты можно сделать следующие выводы:

- проведено детальное обоснование нейтронно-физических характеристик реакторов ИБР-2, БОР-60, БН-350, БН-600, БН-800, БН-1600, СВБР-100, МБИР, БРЕСТ; на первом этапе работы стенда БФС-1 масштабы моделирования первого энергетического реактора БН-350 ограничивались как размерами бака стенда, так и количеством ядерных делящихся материалов для моделирования состава активной зоны; в связи с этим для различных исследуемых параметров приходилось собирать модели определенной конфигурации, позволявшие с максимально возможным приближением исследовать именно этот параметр (спектральные индексы, распределение мощности, эффективность органов СУЗ и т.д.); с пуском стенда БФС-2 появилась возможность полномасштабного моделирования активных зон энергетических реакторов большой мощности;
- реализованы разработка и обоснование различных методик измерений с оценкой их реальных погрешностей;
- выполнены исследования на сборках-бенчмарках [15, 16] (тестирование и уточнение ядерных констант по новым материалам активных зон, таких как свинец, висмут, азот и т.д.; обоснование ядерной безопасности для производств, свя-



занных с новыми видами топлива; безопасность захоронения ядерных материалов в геологических формациях и т.д.);

- ряд методик измерений отработывался и взаимно сравнивался в совместных экспериментах с зарубежными специалистами (Франция, Япония, США) [17]. С учетом разницы в конструкциях критических стенов в разных странах было важно убедиться, что методы расчетов и используемые ядерные константы позволяют с ожидаемой точностью рассчитать требуемые параметры.

Опыт работы на критических сборках – моделях реакторов на быстрых нейтронах – позволил обосновать методики и принять участие в пусках реакторов ИБР-2, БОР-60, БН-350, БН-600, БН-800 и китайского реактора CEFR – аналога реактора БОР-60.

### **ОПЫТ МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА**

Критические стенов БФС-1 и БФС-2 в прошедшие годы достаточно интенсивно (начиная с 1990-х гг.) использовались для международного сотрудничества, включающего в себя

- двухсторонние контракты с научными центрами Франции, США, Японии, КНР, Республики Корея и Индии по экспериментам в обоснование разрабатываемых в этих странах реакторных установок;

- утилизацию экс-оружейного плутония (как в быстрых реакторах, так и в реакторах ВВЭР);

- безопасность топливного цикла;

- трансмутацию младших актинидов,

- отработку и создание систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов;

- международный проект по оценке критических экспериментов (12борок, 43 конфигурации);

- международный проект по оценке реакторных экспериментов (11борок);

- международные эксперименты по сравнению методик измерений реакторных параметров (зарубежные участники – Япония, Франция; критические бороки, кроме БФС – МАЗУРКА, FCA).

### **ПЕРСПЕКТИВЫ РАБОТЫ БФС НА БУДУЩЕЕ**

В рамках Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения» выполнены работы по техническому перевооружению критических стенов БФС:

- изготовление новых блочков материалов для моделирования перспективных активных зон разрабатываемых реакторов нового поколения (дополнительное количество металлического плутония, нитрида урана, обогащенного карбида бора и металлического натрия);

- приобретение современной измерительной аппаратуры для неразрушающего анализа ядерных материалов, а также суперкомпьютера для расчетного сопровождения эксперимента;

- замена практически всех инженерных систем критических стенов (аппаратура СУЗ, системы радиационного контроля, аварийной сигнализации о возникновении ЦПР, приточной и вытяжной вентиляции, электроснабжения и др.);

- переоборудование помещений хранилища ядерных материалов.

Проведенное техническое перевооружение критических стенов БФС позволит проводить обоснование с необходимой точностью нейтронно-физических характеристик перспективных реакторов типа БН, БРЕСТ, СВБР и др., оптимизацию па-

раметров замкнутого топливного цикла ядерной энергетики, а также расширить возможности стендов, включая выполнение зарубежных контрактов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Критические стенды БФС-1 и БФС-2 как в прошлом, так и в настоящее время интенсивно используются для обеспечения российских проектов ядерных реакторов и для международного сотрудничества в области мирного использования ядерной энергии. Стенды оснащены необходимыми материалами, аппаратурой для исследований, квалифицированным научным и эксплуатационным персоналом. С завершением технического перевооружения комплекс критических стендов БФС становится крупнейшей в мире исследовательской ядерной установкой для моделирования быстрых реакторов, полностью отвечающей современным требованиям.

Авторы выражают искреннюю благодарность профессору кафедры расчета и конструирования реакторов Обнинского института атомной энергетики НИЯУ «МИФИ» Юрию Алексеевичу Казанскому за конструктивную критику и замечания при подготовке статьи.

## Литература

1. Казачковский О.Д. Реакторы на быстрых нейтронах. Научно-технические мемуары. – Обнинск: ИАТЭ, 1995. – 135 с.
2. Материалы Международной конференции «БФС-50». Обнинск, 28.02. – 01.03. 2012. – Обнинск: ОНТИ ГНЦ РФ-ФЭИ, 2012. – 287 с.
3. Основные правила учета и контроля ядерных материалов НП-030-12. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2012. – 48 с.
4. Казанский Ю.А., Дулин В.А., Зиновьев В.П. и др. Методы изучения реакторных характеристик на критических сборках БФС. – М.: Атомиздат, 1977. – 88 с.
5. Белов С.П., Герасимов П.В., Казанский Ю.А. и др. Расчетно-экспериментальное исследование натриевого пустотного эффекта реактивности. // Атомная энергия. – 1979. – Т. 47. – С. 161-164.
6. Казанский Ю.А., Матвеев И.П., Тютюнников П.Л. и др. К учету пространственных эффектов при измерении реактивности методом обращенного решения уравнения кинетики. // Атомная энергия. – 1981. – Т. 51. – С. 387-389.
7. Казанский Ю.А., Дулин В.А., Сидоров Г.И. и др. Изучение параметров конверсии на быстрых критических сборках БФС. // Атомная энергия. – 1982. – Т. 52. – С. 203-204.
8. Казанский Ю.А., Ваньков А.А., Возяков В.В. и др. Изучение спектров нейтронов на сборках БФС. // Атомная энергия. – 1982. – Т. 52. – С. 235-240.
9. Белов С.П., Бобров С.Б., Казанский Ю.А. и др. Расчетно-экспериментальные исследования модели быстрого реактора с гетерогенной активной зоной. // Атомная энергия. – 1987. – Т. 62. – С. 354-361.
10. Seleznev E.F., Belov A.A., Mushkaterov A.A., Matveenko I.P., Zhukov A.M., Raskatch K.F. Fast breeder reactor kinetics. A direct problem. PHYSOR-2010. – Pittsburgh, USA, 2010.
11. Seleznev E.F., Belov A.A., Mushkaterov A.A., Matveenko I.P., Zhukov A.M., Raskatch K.F. Fast breeder reactor kinetics. An inverse problem. PHYSOR-2010. – Pittsburgh, USA, 2010.
12. Селезнев Е.Ф., Белов А.А., Матвеев И.П., Жуков А.М., Раскач К.Ф. Кинетика реакторов на быстрых нейтронах. // Ядерная физика и инжиниринг. – 2012. – Т. 3. – № 1. – С. 28-40.
13. Seleznev E.F., Belov A.A., Matveenko I.P., Zhukov A.M., Raskatch K.F. On fast reactor kinetics studies. PHYSOR-2012 – Advances in Reactor Physics – Linking Research, Industry, and Education, Knoxville, Tennessee, USA, April 15-20, 2012, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL.
14. Селезнев Е.Ф., Белов А.А., Панова И.С., Матвеев И.П., Михайлов Г.М., Жуков А.М. Пространственная кинетика в реакторах на быстрых нейтронах. Международная конференция по быстрым реакторам и соответствующим топливным циклам: безопасные технологии и устойчивые сценарии – FR13. 4-7 марта 2013г., Париж, Франция.

15. *Manturov G.N., Kochetkov A.L., Semenov M.Y.* BFS-73-1 Assembly: Experimental Model of Sodium-cooled Fast Reactor with Core of Metal Uranium Fuel of 18.5% Enrichment and Depleted Uranium Dioxide Blanket. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments NEA, 2012.

16. *Готье Ж.К., Вест Дж.П., Матвеев И.П.* Сравнение эффективности органов управления в быстрых реакторах. // Атомная энергия. – 1989. – Т. 66. – Вып. 5. – С. 302-308.

17. *Матвеев И.П., Двухшерстнов В.Г., Ефименко В.В.* Физическая инвентаризация ядерных материалов на стенде БФС. Сб. трудов 2-й Международной конференции по учету, контролю и физической защите ядерных материалов. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2000. – С. 70-77.

Поступила в редакцию 18.04.2016 г.

#### Авторы

Двухшерстнов Владимир Георгиевич, начальник комплекса БФС, Отделение ядерных реакторов и топливного цикла (ОЯРиТЦ),  
E-mail: bfs@ippe.ru

Жуков Александр Максимович, начальник смены ККС, ОЯРиТЦ, к.т.н.  
E-mail: ajukov@ippe.ru

Клинов Дмитрий Анатольевич, зам. генерального директора – директор ОЯРиТЦ, к.т.н.  
E-mail: dklinov@ippe.ru

Матвеев Игорь Павлович, советник директора ОЯРиТЦ, к.ф.-м.н.  
E-mail: matveenko@ippe.ru

Пшакин Геннадий Максимович, в.н.с., лаб. 40, ОЯРиТЦ, к.т.н.  
E-mail: pshakin@ippe.ru

UDC 621.039.51

### **BFS: PAST, PRESENT AND FUTURE**

Dvukhsheerstnov V.G., Zhukov A.M., Klinov D.A., Matveenko I.P., Pshakin G.M.

JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»

1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

#### ABSTRACT

At present, the BFS complex of fast critical facilities is an outstanding (and unique) experimental facility designed for full scale simulation of different nuclear reactor types. Created in the 1960-s, the complex is still an efficient experimental facility for predicting the main physical parameters of fast neutron reactors with high precision. These include criticality, CR worth, volume power distribution, sodium void reactivity effect and other special parameters. Special-purpose critical assemblies – benchmarks – mounted at BFS allow revising nuclear data, measurement techniques and calculation methods used for designing fast neutron reactors. The BFS complex has been effectively used in the framework of international collaboration.

During these collaborations were created some experiments: connected with influence of homogenous adding of  $^{237}\text{Np}$  in to fuel of fast reactor on efficiency of absorbers and sodium void reactivity effects (France); creation of CEFR core and measuring of neutron parameters (China); creation of benchmarks connected with ex-weapon grade Pu disposal in geological formations and nuclear safety of MOX fuel production (USA); creation of different variants of KALIMER reactor core (Korea),



models of BN-600 type reactor (India); influence of sodium cavity on fast reactor core parameters (Japan), creation of modern material control and accounting system (USA).

A significant amount of different nuclear materials accumulated at BFS and used for simulations requires special attention to provide their security. Advanced methods, technologies and equipment are used to ensure effective functioning of the material protection, accounting and control systems. While in operation, the BFS equipment was regularly upgraded and retrofitted and this process is still underway. New tasks emerging due to the development of the closed fuel cycle strategy in Russian nuclear power call for further development and upgrading of the BFS complex and use of new nuclear materials.

**Key words:** critical assembly, core simulation, fast neutrons reactors, nuclear material accounting and control, physical protection, reactivity effects, control rods effectiveness, power distribution, sodium void effect reactivity.

#### REFERENCES

1. Kazachkovsky O.D. Fast neutron reactors. Scientific-technical memoirs. Obninsk. IATE Publ., 1995, 135 p. (in Russian).
2. Proceedings of the International Conference Dedicated to the 50<sup>th</sup> Anniversary of the BFS Facility, 28 Feb – 01 Mar 2012. Obninsk. Scientific and Technical Information Department of SSC RF-IPPE Publ., 2012. 287 p. (in Russian).
3. Basic Rules for Accounting and Control of Nuclear Materials, NP-030-12. Moscow. FBU «NTC YaRB» Publ., 2012. 48 p. (in Russian).
4. Kazansky Yu.A., Dulin V.A., Zinoviev V.P., Belov S.P., Mamontov V.F., Tyutyunnikov P.L. Metody izycheniya reaktornykh kharakteristik na kriticheskikh sborkakh BFS. [Methods for studying reactor characteristics on critical assemblies of the BFS Facility.] Moscow. Atomizdat Publ., 1977. 88 p. (in Russian).
5. Belov S.P., Gerasimov P.V., Kazansky Yu.A., Marveev V.I., Pshakin G.M., Tyutyunnikov P.L. Raschetno-eksperimentalnoe issledovanie natrievogo pustotnogo effecta reaktivnosti. [Calculation-experimental study of the sodium void effect of reactivity.] *Atomnaya energiya*, 1979, v.47, pp. 161-164 (in Russian).
6. Kazansky Yu.A., Matveenko I.P., Tyutyunnikov P.L., Shokod'ko A.G. K uchotu prostranstvennykh effectov pri izmerenii reaktivnosti metodom obraschennogo resheniya uravneniya kinetiki. [To the account of spatial effects in the measurement of reactivity by the inverse solution method of the kinetics equation.] *Atomnaya energiya*, 1981, v.51, p. 387-389 (in Russian).
7. Kazansky Yu.A., Dulin V.A., Sidirov G.I., Mamontov V.F., Mozhaev V.K. Izuchenie parametrov konversii na bystrykh kriticheskikh sborkakh BFS. [Study of conversion parameters on fast critical assemblies of the BFS facility.] *Atomnaya energiya*, 1982, v.52, pp. 203-204 (in Russian).
8. Kazansky Yu.A., Van'kov A.A., Vozyakov V.V., Voropaev A.I., Vorotincev M.F., Kuzin E.N., Lityaev B.M., Pivovarov V.A., Shapar' A.V. Izuchenie spektrov neutronov na sborkakh BFS. [The study of neutron spectra on assemblies of the BFS facility.] *Atomnaya energiya*, 1982, v. 52, pp. 235-240 (in Russian).
9. Belov S.P., Bobrov S.B., Kazansky Yu.A., Kuzin E.N., Metveev V.I., Novozhilov A.I. Cherniy V.A. Raschetno-eksperimental'nye issledovaniya modeli bystrogo reaktora s geterogennoy aktivnoy zonoj. [Calculation and experimental studies of the model of fast reactor with heterogeneous core.] *Atomnaya energiya*, 1987, v. 62, pp. 354-361 (in Russian).
10. Seleznev E.F., Belov A.A., Mushkaterov A.A., Matveenko I.P., Zhukov A.M., Raskatch K.F. Fast breeder reactor kinetics. A direct problem, PHYSOR-2010, 2010, Pittsburgh, USA.
11. Seleznev E.F., Belov A.A., Mushkaterov A.A., Matveenko I.P., Zhukov A.M., Raskatch K.F., Fast breeder reactor kinetics. An inverse problem, PHYSOR-2010, 2010, Pittsburgh, USA.
12. Seleznev E.F., Belov A.A., Matveenko I.P., Zhukov A.M., Raskatch K.F. Kinetika reaktorov

na bystryh neytronah. [Fast breeder reactor kinetics.] *Yadernaya fizika i inzhiniring*, 2012, v. 3, pp. 28-40 (in Russian).

13. Seleznev E.F., Belov A.A., Matveenko I.P., Zhukov A.M., Raskatch K.F. On fast reactor kinetics studies, PHYSOR-2012 – Advances in reactor Physics – Linking Research, Industry, and Education. Knoxville, Tennessee, USA, April 15-20, 2012. On CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL.

14. Seleznev E.F., Belov A.A., Panova I.S., Matveenko I.P., Mikhaylov G.M., Zhukov A.M. Spatial kinetics in fast reactors. International conference on fast reactors and fuel cycles – FR13, 2013, 4–7 of March, Paris, France.

15. Manturov G.N., Kochetkov A.L., Semenov M.Y., BFS-73-1 Assembly: Experimental Model of Sodium-cooled Fast Reactor with Core of Metal Uranium Fuel of 18.5% Enrichment and Depleted Uranium Dioxide Blanket. *International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments NEA*, 2012.

16. Gauthier J.C., West J.P., Matveenko I.P. Comparison of absorber rod worths in fast reactors. *Atomnaya Energiya*, 1989, v. 66, iss. 5, pp. 302-308 (in Russian).

17. Matveenko I.P., Dvukhsheerstnov V.G., Efimenko V.V. Physical Inventory of Nuclear Materials on BFS Facility. Proceedings of the 2-nd MPC&A Conference. Obninsk. SSC RF-IPPE Publ., 2000, pp. 70-77 (in Russian).

#### Authors

Dvukhsheerstnov Vladimir Georgievich, Chief Engineer of BFS Complex

E-mail: bfs@ippe.ru

Zhukov Alexander Maksimovich, Head of Shift BFS Complex, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: ajukov@ippe.ru

Klinov Dmitri Anatolievich, Deputy Director General, Head of Department, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: dklinov@ippe.ru

Matveenko Igor Pavlovich, Director's Advisor, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: matveenko@ippe.ru

Pshakin Gennady Maksimovich, Senior Scientist, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: pshakin@ippe.ru