

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОЙ ЗОНЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА МБИР НА КРИТИЧЕСКОМ СТЕНДЕ БФС-1

*Клинов Д.А.¹, Гулевич А.В.¹, Михайлов Г.М.¹, Бедняков С.М.¹, Безбородов А.А.¹,
Третьяков И.Т.²*

¹ АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,
249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

² АО «НИКИЭТ»,
107140, г. Москва, пл. Академика Доллежалея, д.1, к.3



Представлены результаты моделирования на быстром физическом стенде БФС-1 активной зоны многоцелевого быстрого исследовательского реактора МБИР. Моделирование выполнено в соответствии с рекомендацией органа научно-технической поддержки Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору – ФБУ «НТЦ ЯРБ». Результаты моделирования представлены для минимальной критической конфигурации и стартовой активной зоны. Исследование параметров нейтронно-физических характеристик в условиях минимальной критической конфигурации позволяет с высокой точностью оценить неопределенность расчета критичности, вызванную погрешностью паспортных характеристик топлива в тепловыделяющих сборках (ТВС). Измерения позволяют оценить эффективность как отдельных групп, так и различных комбинаций регулирующих органов систем управления и защиты реактора (РО СУЗ) в активной зоне без присутствия поглотителя. Это связано с тем, что на данном этапе РО СУЗ находятся во взведенном положении. В рамках исследований на критической сборке с начальной загрузкой было проведено несколько экспериментов, направленных на анализ влияния разных типов топлива на реактивность сборки и эффективность макетов РО СУЗ. Были зафиксированы изменения реактивности загрузки макетов топливных стержней (ТС) с различными видами топлива, которые были сопоставлены с координатами макетов экспериментальных устройств (ЭУ) реактора МБИР. Определение эффективности необходимо для полноты картины интерференции РО СУЗ. Данные измерений используются для восстановления эффективности систем РО СУЗ по результатам измерений одиночных РО СУЗ в случаях, когда измерение эффективности систем невозможно по техническим причинам. Полученные результаты измерений нейтронно-физических характеристик

активной зоны будут использованы при обосновании безопасности будущей программы исследований, верификации и аттестации расчетных кодов.

Ключевые слова: нейтронно-физические характеристики, критический стенд, рабочие органы СУЗ, критическая сборка, метод измерения, эффекты реактивности, экспериментальные устройства.

Для цитирования: Клинов Д.А., Гулевич А.В., Михайлов Г.М., Бедняков С.М., Безбородов А.А., Третьяков И.Т. Экспериментальное обоснование нейтронно-физических характеристик активной зоны исследовательского реактора МБИР на критическом стенде БФС-1. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 4. – С. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.02>

ВВЕДЕНИЕ

Правила ядерной безопасности требуют контролировать каждый шаг вывода реактора в критическое состояние: от постановки источника нейтронов в реактор без топлива до достижения критической массы топлива с заданным запасом реактивности, причем шаги должны быть гарантированно безопасными, и безопасность должна основываться на измерениях.

В ходе экспертизы документов, обосновывающих ядерную безопасность реактора МБИР, ФБУ «НТЦ ЯРБ» рекомендовало предварительно, до физического пуска, выполнить ряд экспериментов, в ходе которых экспериментально обосновать безопасность загрузки топлива в реактор и уточнить количество топлива в загружаемых порциях. Реализацию задуманного было решено выполнить на критическом стенде БФС-1, размеры которого позволяли провести полномасштабное моделирование активной зоны реактора МБИР.

Моделирование условий, в которых осуществляются измерения на критическом стенде, способствует повышению надежности результатов благодаря расширению числа методов измерений и возможности варьирования расположения детекторов.

В ходе планирования экспериментов на критическом стенде БФС-1 было решено разбить физический пуск на два этапа, отдельно выделив этап загрузки топлива до достижения минимальной критической конфигурации. Этот этап не является обязательным, но он помогает уточнить неопределенности расчета критичности, учитывая возможные неточности в паспортных характеристиках топлива в ТВС, таких как масса, изотопный состав и другие параметры. Кроме того на этом этапе наиболее просто и точно можно оценить эффективность как отдельных РО СУЗ, так и в группах и их интерференцию.

На следующей стадии моделирование активной зоны со стартовой критической загрузкой дает экспериментальную оценку нейтронно-физических характеристик реактора МБИР, что важно для тестирования расчетных кодов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАГРУЗКИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В АКТИВНУЮ ЗОНУ РЕАКТОРА МБИР С ЦЕЛЬЮ ДОСТИЖЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ МАССЫ В КОНФИГУРАЦИИ, СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ МИНИМАЛЬНОМУ КРИТИЧЕСКОМУ ЗНАЧЕНИЮ

Физический пуск реактора МБИР начинается с загрузки нейтронного источника в активную зону, заполненную макетами ТС, и после этого проводится порционная замена макетов на топливные стержни БФС-1.

В межтрубный зазор центральной ячейки, представляющей собой модель трубы центрального петлевого канала, был помещен пусковой источник нейтронов Pu-Be, генерирующий поток порядка 7×10^6 нейтронов в секунду. Были проведены измерения показаний детекторов как до, так и после размещения пускового источника, причем увеличение интенсивности счета при постановке источника было более чем в два раза.

Требования к обеспечению безопасности при наборе неизвестной критической конфигурации и процедура набора неизвестной критической конфигурации приведены в Правилах ядерной безопасности¹. Набор ключевых характеристик сборки, воспроизводящей активную зону реактора МБИР, был выполнен с целью ее последующего применения для моделирования аналогичных процессов в реакторе МБИР. Для создания макета ТВС реактора МБИР были использованы несколько макетов ТС критического стенда БФС-1.

В процессе загрузки макетов ТС в сборку активной зоны реактора предполагалось построение кривых обратного счета на основании данных, полученных с трех штатных импульсных каналов контроля плотности потока нейтронов на критическом стенде БФС-1. Параллельно строились кривые обратного умножения, основанные на показаниях нейтронных детекторов, расположенных в металлической колонне стенда, т.е. на большем расстоянии, чем штатные детекторы. Эти детекторы имитировали пусковые измерительные каналы реактора МБИР.

В качестве детекторов использовались камера деления КНТ-54 и гелиевый счетчик нейтронов СНМ-18, функционирующий в импульсном режиме. На основе этих детекторов строили кривые обратного умножения для порций, которые подвергались расчетам и моделированию, имитируя установку ТВС реактора.

На рисунке 1 представлена расчетная схема активной зоны критической сборки БФС-1 с нанесенной на нее сеткой расположения ТВС реактора МБИР.

В стартовой критической конфигурации критическая сборка БФС-1 имела макеты органов регулирования, находящиеся в погруженном состоянии, и макеты органов аварийной защиты, находящиеся в полупогруженном состоянии.

На рисунке 2 представлены данные, полученные при наборе критической конфигурации сборки БФС-1 в единицах условных ТВС реактора МБИР.

На рисунке 3 отображена диаграмма обратного умножения от количества загруженных ТВС – данные при переходе от сборки БФС-1 с минимальной критической конфигурацией к сборке БФС-1 со стартовой критической загрузкой (загрузка – в единицах условных ТВС МБИР).

ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТДЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ И СИСТЕМ РО СУЗ РЕАКТОРА МБИР

Для увеличения надежности результатов измерений эффективности органов СУЗ были использованы два метода измерения – метод «разгон – сброс» на основе обращенного решения уравнений кинетики (ОРУК) и метод обратного умножения (МОУ).

Эффективность РО СУЗ при измерении методом «разгон-сброс», оценивалась через разницу реактивностей, которые наблюдаются при его подвешивании над полостью, сформированной трубами макета этого органа, в состоянии «разгона», и уровня подкритичности, зафиксированного в момент завершения движения органа.

¹ Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила ядерной безопасности критических стендов» (НП-008-16). Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 августа 2016 года N 348.

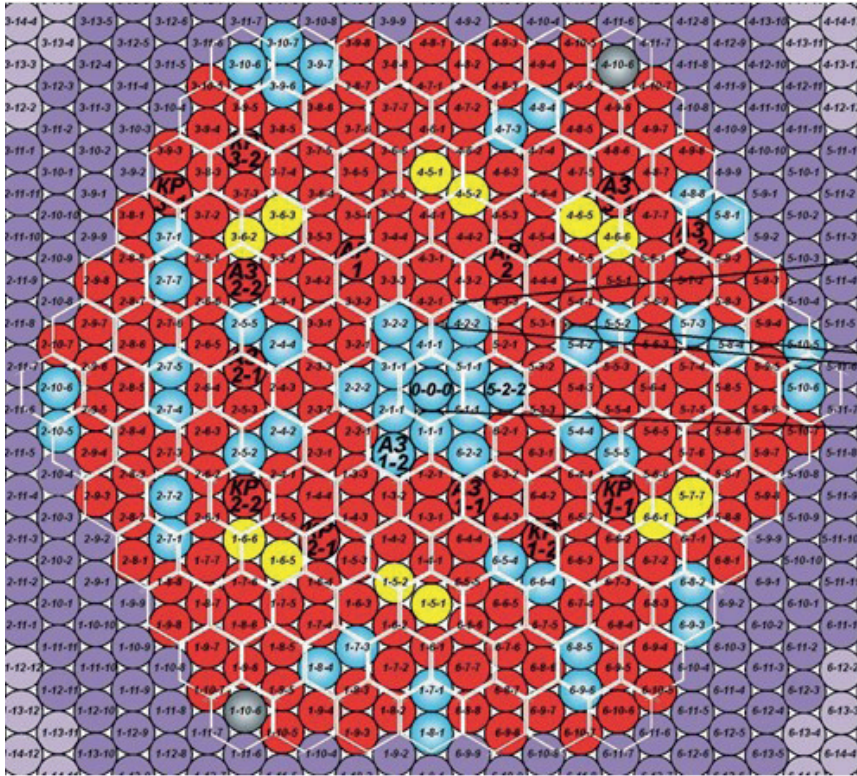


Рис. 1. Расчетная схема активной зоны критической сборки БФС-1 с сеткой расположения ТВС реактора МБИР. На картограмме красным цветом отмечены макеты ТВС, синим – макеты ЭУ, желтым – макеты РО СУЗ

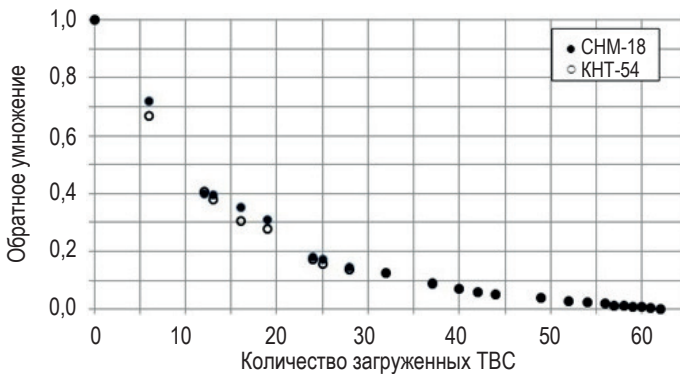


Рис. 2. Кривые обратного умножения при наборе критической конфигурации сборки БФС-1

В ходе измерений методом МОУ эффект реактивности, возникающий при введении РО СУЗ поглотителя в активную зону, достигался путем извлечения макета гильзы РО СУЗ, соответствующего выведенному из активной зоны поглотителю, и замены его на макет органа СУЗ, соответствующего введенному в активную зону поглотителю.

Проведены измерения эффективности макетов РО СУЗ, полученные двумя относительно независимыми методами – методами ОРУК и МОУ на минимальной критической конфигурации сборки активной зоны реактора МБИР.

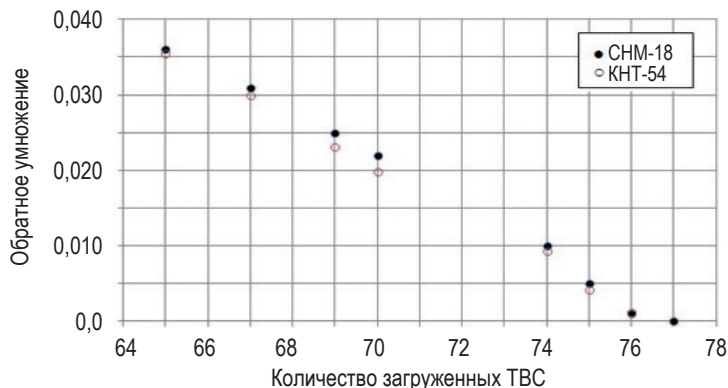


Рис. 3. Кривые обратного умножения при переходе от сборки БФС-1 с минимальной критической конфигурацией к сборке БФС-1 со стартовой критической загрузкой в единицах условных ТВС МБИР

Результаты показали:

- различие измерений двумя методами для отдельных систем не превышает 6% (т.е. в диапазоне подкритичностей от минус 6 $\beta_{эф}$ до минус 12 $\beta_{эф}$);
- различие измерений двумя методами для одновременного введения систем компенсаторов реактивности (КР) и ручного регулирования (РР) не превышает 15% (т.е. в диапазоне подкритичностей от минус 12 $\beta_{эф}$ до минус 25 $\beta_{эф}$);
- измерения двумя методами показывают высокую степень соответствия результатов, а расхождение не превышает 3% для макетов одиночных органов (т.е. в диапазоне подкритичностей до минус 6 $\beta_{эф}$).

Из этого следует, что отклонения находятся в пределах допустимой погрешности измерений.

Следует подчеркнуть, что данные, полученные при измерении реактивности с помощью трех штатных детекторов реактиметра КНК-56, расположенных рядом со стенкой бака критической сборки, отличаются от значений, рассчитанных по показаниям КНК-15, расположенной в металлической колонне на значительном расстоянии при моделировании «пускового» детектора, не более чем на 5%.

ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ МАКЕТОВ ТС С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ТОПЛИВА ПРИ ИХ УСТАНОВКЕ В АКТИВНУЮ ЗОНУ В МОДЕЛИ СТАРТОВОГО СОСТОЯНИЯ РЕАКТОРА МБИР

Целью этой серии экспериментов было измерить, как будут изменяться эффективность РО СУЗ реактора и запас реактивности при постановке в макеты ЭУ макетов ТС, моделирующих разные виды топлива. Были сформированы макеты ТС, моделирующие смешанное уран-плутониевое оксидное топливо (МОКС) с различным содержанием изотопа 240-плутония (низкофононовый (МОКС-НФ) и высокофононовый (МОКС-ВФ)), смешанное нитридное уран-плутониевое топливо (СНУП) и металлическое топливо (Металл). Были выполнены измерения эффективности макетов ТС всех типов для разного количества установленных в активную зону стержней в позиции макетов ЭУ. В каждом эксперименте критичность реактора достигалась заменой состава макета РО СУЗ гильзы на поглотитель (естественный бор) до нижней границы активной зоны в макетах компенсирующих стержней.

Исследование результативности макетов ТС проводилось в несколько этапов. На первом этапе оценивалась эффективность замены первых четырех макетов ЭУ на макеты ТС. Затем оценивалась эффективность замены макетов ЭУ на макеты ТС до достижения нижней границы активной зоны поглотителем. После этого методом перекомпенсации измерялась эффективность одиночных замен макетов ЭУ на макеты ТС.

В таблице 1 представлены результаты, демонстрирующие влияние реактивности замены макетов ЭУ на макеты ТС. Эти данные сравниваются с предварительными расчетами, проводимыми для четырех и 17-ти макетов ТС. Эффект от замены также был подтвержден экспериментально с помощью выборочных измерений, которые осуществлялись при возврате критической сборки БФС-1 в ее исходное состояние путем обратной замены макетов ТС на макеты ЭУ.

Таблица 1

Сравнение экспериментальных данных (Эксп) с расчетными (Расч) эффектов реактивности замены макетов ЭУ на макеты ТС в зависимости от типа топлива

Количество макетов ТС	Эффективность макетов ТС Расч/Эксп			
	СНУП	МОКС-НФ	МОКС-ВФ	Металл
4	0,95	0,85	0,94	0,89
17	0,86	0,90	0,90	0,90

Затем проводились измерения одиночных замен с использованием метода перекомпенсации, в результате которых была зафиксирована определенная разница, ставшая основой для окончательных выводов. Анализируя компенсационные способности макетов компенсирующих стержней на различных типах топлива, можно заметить, что они остаются стабильными в пределах статистической погрешности и совпадают с эффективностью, определенной в ходе измерений, проводимых по методам «разгон – сброс» и обратного умножения.

Усредненные показатели эффективности макетов рабочих органов аварийной защиты (РО АЗ) и рабочих органов автоматического регулирования (РО АР) для реактора МБИР, когда вместо макетов ЭУ было загружено максимально возможное количество макетов ТС с различными видами топлива, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Относительная эффективность макетов РО АЗ и РО АР в стартовой конфигурации активной зоны критической сборки БФС-1 с максимальным количеством экспериментальных ТС, $\beta_{эф}$

Макет РО СУЗ	Относительная эффективность макетов АЗ и АР с различными видами ТС в стартовой конфигурации активной зоны критической сборки БФС-1 (установлено максимальное количество ТС)			
	СНУП	МОКС-НФ	МОКС-ВФ	Металл
МАЗ-1	0,99±0,05	0,99±0,05	1,00±0,05	1,01±0,05
МАЗ-2	0,98±0,05	0,96±0,05	1,04±0,05	1,01±0,05
МАЗ-1, -2	-1,03±0,05	1,00±0,05	1,03±0,05	1,00±0,05
МАР-1	–	1,13±0,05	1,04±0,05	0,98±0,05
МАР-2	–	-1,17±0,05	1,05±0,05	1,02±0,05

Из полученных данных следует, что эффективность макетов РО АЗ не связана с типом топлива, используемого в макетах ЭУ, а также не зависит от количества размещаемых макетов ТС (но при количестве макетов ТС не более общего количества макетов ЭУ). Аналогично эффективность РО АР не зависит от типа топлива, загружаемого в макеты ЭУ, а также от его количества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На критической сборке БФС-1 проведены эксперименты по набору критической массы топлива как для минимальной критической конфигурации, так и для стартовой конфигурации критической сборки БФС-1 – модели активной зоны реактора МБИР. Приведены результаты измерений характеристик макетов одиночных РО СУЗ, а также эффективность их систем. Кроме того были определены эффекты реактивности при загрузке макетов ТС с различными типами топлива (СНУП, МОКС, металлическое) в координаты моделей ЭУ реактора МБИР.

Результаты измерения эффективности макетов РО СУЗ показали высокую степень согласованности. Различия не превышают 3% для одиночных РО СУЗ (т.е. в диапазоне подкритичностей до минус $6 \beta_{эф}$), 6% для отдельных систем (т.е. в диапазоне подкритичностей от минус $6 \beta_{эф}$ до минус $12 \beta_{эф}$) и 15% для одновременного введения систем КР и РР (т.е. в диапазоне подкритичностей от минус $12 \beta_{эф}$ до минус $25 \beta_{эф}$). Все эти отклонения находятся в пределах допустимой погрешности измерений.

Измерены эффекты реактивности загрузки макетов топливных стержней с различными видами топлива (СНУП, МОКС, металлическое) в координаты макетов ЭУ реактора МБИР. Сравнение данных, полученных из ранних расчетов реактивности при замене макетов ЭУ на макеты ТС для различных видов топлива, показывает, что рассчитанные значения в среднем занижены примерно на 10%. Это расхождение отчасти обусловлено ошибками в вычислении эффективной доли запаздывающих нейтронов, которая служит переводным коэффициентом между теоретическими расчетами и экспериментальными данными. Учитывая этот фактор, можно утверждать, что ошибка в экспериментальных результатах не превышает 5%, что подтверждает высокую эффективность полной загрузки.

Экспериментальные исследования подтверждают, что эффективность систем аварийной защиты не подвержена влиянию типа топлива, используемого в макетах ТС, и не зависит от их числа при условии, что это число не более общего количества макетов ЭУ. Также установлено, что эффективность РО АР никак не коррелирует с характером топлива, загружаемого в эти устройства, и его объемом.

Поступила в редакцию 14.04.2024

После доработки 30.10.2024

Авторы

Клинов Дмитрий Анатольевич, заместитель научного руководителя по перспективным темам, к.т.н.,

E-mail: dklinov@ippe.ru

Гулевич Андрей Владиславович, начальник департамента физики реакторов, д.ф.-м.н,

E-mail: avgulevich@ippe.ru

Михайлов Геннадий Михайлович, начальник лаборатории, к.т.н.,

E-mail: matr@ippe.ru

Бедняков Сергей Михайлович, ведущий научный сотрудник, к.т.н.,

E-mail: bednyakov@ipre.ru

Безбородов Александр Александрович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.,

E-mail: aba@ipre.ru

Третьяков Игорь Товиевич, главный конструктор ИИР – директор отделения,

E-mail: ITTretyakov@rosatom.ru

UDC: 621.039.5

Experimental Validation of Neutronic Parameters of the MBIR Reactor Core at the BFS-1 Critical Facility

Klinov D.A.¹, Gulevich A.V.¹, Mikhailov G.M.¹, Bednyakov S.M.¹, Bezborodov A.A.¹, Tretyakov I.T.²

¹ IPPE JSC,

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

² NIKIET JSC,

1 bldg. 3 Acad. Dollezhal Sq., 107140 Moscow, Russia

Abstract

The paper presents results of simulating the core of the MBIR multi-purpose fast research reactor at the BFS-1 critical facility. Simulations were carried out in accordance with recommendations from the Federal Budgetary Institution "Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety", Rostekhnadzor's scientific and technical support body.

The simulation results are presented for the smallest possible critical configuration and the starting reactor core.

Studying the neutronic parameters in conditions of the smallest possible critical configuration allows the criticality calculation uncertainty caused by the error in the specification for fuel in fuel assemblies (FA) to be estimated highly accurately. Another advantage of the measurements made on the smallest possible critical configuration is that the worth values for individual control rods and different combinations of CR systems are measured with no absorber in the core due to cocked position of the control rods at this stage. Such measurements reveal the CR interference at the most, which can be later used to recover the worth of CR systems from the measurements of individual control rods when it is not technically feasible to measure it. The critical assembly that simulates the initial fuel loading is used for experiments aimed at investigating how different types of fuel affect the reactivity of the critical assembly and the worth of the control rod mock-ups. Different reactivity effects from loading fuel rod mock-ups with alternative fuel types are found and checked against the coordinates of mock-ups for MBIR's experimental devices.

The results obtained from the measurements of the core neutronic parameters will be used to prove the safe implementation of the future research programme and to verify and validate computer codes.

Keywords: neutronic parameters, critical facility, control rods, critical assembly, measurement method, reactivity effects, experimental devices.

For citation: Klinov D.A., Gulevich A.V., Mikhailov G.M., Bednyakov S.M., Bezborodov A.A., Tretyakov I.T. Experimental Validation of Neutronic Parameters of the MBIR Reactor Core at the BFS-1 Critical Facility. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 4, pp. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.02> (in Russian).

Authors

Dmitry A. Klinov, Deputy Scientific Director for Promising Topics, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: dklinov@ippe.ru

Andrey V. Gulevich, Head of the Reactor Physics Department, Dr. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: avgulevich@ippe.ru

Gennady M. Mikhailov, Head of the Laboratory, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: matr@ippe.ru

Sergey M. Bednyakov, Senior Researcher, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: bednyakov@ippe.ru

Alexander A. Bezborodov, Senior Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: aba@ippe.ru

Igor T. Tretyakov, Chief Designer of the IIR – Director of the department,

E-mail: ITTretyakov@rosatom.ru