

УДК 621.039.531:621.039.526

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ МЕТАЛЛА В СОСТАВЕ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОЙ СБОРКИ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА БН-600

© 2022 Е.С. Кирилова\*, А.А. Радионычева\*\*, М.Р. Фарахшин\*\*\*

АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, 603074, Россия

\*e-mail: kirilova\_es@okbm.nnov.ru,

\*\*e-mail: radionycheva\_aa@okbm.ru,

\*\*\*e-mail: farakhshin@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию: 09.12.2022

После доработки: 09.12.2022

Принята к публикации: 13.12.2022

Для продления срока эксплуатации реактора БН-600 необходимо обосновать сохранение работоспособности незаменимых элементов реактора, в том числе отражателя нейтронов, которые работают в условиях высоких повреждающих доз и температур. Такую возможность дает облучение металла пакета-имитатора в составе материаловедческой сборки, устанавливаемой в реактор БН-600. В статье представлены основные характеристики сборки, в том числе конструктивные особенности и параметры облучения. Представлены основные принципы выбора места размещения МС в реакторе и материаловедческих образцов внутри сборки для обеспечения требуемых условий облучения образцов металла. Также рассмотрено влияние установки материаловедческой сборки на характеристики штатных сборок реактора, на поле нейтронного потока при сопоставлении вариантов размещения сборки внутри активной зоны и в боковой зоне воспроизводства реактора. Для расчета параметров облучения и влияния установки сборки в зоне используются те же методики и программы, что и при проектировании активной зоны реактора. Показано минимальное влияние материаловедческой сборки на нейтронно-физические характеристики активной зоны при установке в боковую зону воспроизводства.

**Ключевые слова:** БН-600, активная зона, продление срока эксплуатации, материаловедческая сборка, пакет-имитатор, нейтронно-физические характеристики, поле нейтронного потока, повреждающая доза, флюенс нейтронов, температура.

**DOI:** <https://doi.org/10.26583/vestnik.2022.10>

### ВВЕДЕНИЕ

Энергетический реактор на быстрых нейтронах БН-600 успешно эксплуатируется с 1980 г. с первоначальным проектным сроком службы 30 лет [1]. В настоящее время действующей лицензией работа реактора разрешена до 2025 г. Для дополнительного продления срока эксплуатации установки до 60 лет разработана «Программа материаловедческих работ по обоснованию работоспособности незаменимых элементов реактора БН-600 до 60 лет».

Незаменимые элементы реакторной установки БН-600, работающие под действием нейтронного облучения, повышенных температур, а также статической и циклической нагрузок, будут накапливать повреждения как за счет теплового старения, так и за счет нейтронного облучения. Одним из основных элементов, ограничивающим ресурс реактора БН-600, наряду с корпусом реактора, подпоркой, напор-

ной камерой, коллекторами, является отражатель нейтронов, который эксплуатируется в условиях высоких повреждающих доз и температур [2]. Поскольку для контроля за изменением механических свойств конструкционных материалов не могут быть использованы части металла из работающих незаменимых элементов, работы по исследованию могут быть выполнены с использованием облученного в данном реакторе металла из числа ряда заменяемых элементов, близкого химического состава и близкого режима термической обработки [3]. Кроме того, металл заменяемых элементов должен быть выбран исходя из возможности его дополнительного облучения (в материаловедческой сборке) и старения (в лабораторных условиях), режимы которых обеспечивают моделирование условий продления эксплуатации незаменимого оборудования. С учетом анализа отмеченных обстоятельств было принято, что контроль изменения механических свойств не-

заменяемого оборудования, в частности отражателя нейтронов, может быть выполнен с использованием металла так называемых «пакетов-имитаторов сниженного уровня натрия», облученных в реакторе.

Пакет-имитатор сниженного уровня натрия относится к штатным изделиям реактора БН-600 и размещается в боковом экране активной зоны. Пакет-имитатор служит для организации циркуляции натрия на остановленном реакторе в определенных режимах работы реактора и подлежит замене после достаточно продолжительной работы. Рассматриваемый пакет-имитатор № 4 был установлен в реактор БН-600 в стартовую загрузку и выгружен весной 2020 г. после 78-й микрокампании.

При продлении срока эксплуатации РУ БН-600 до 60 лет максимальная повреждающая доза для отражателя нейтронов составит 57.5 сна, флюенс нейтронов с энергией свыше 0.1 МэВ  $\sim 1.35 \times 10^{23}$  н/см<sup>2</sup>, диапазон температуры облучения – (450–530) °С. В таких условиях аустенитные стали претерпевают высокотемпературное радиационное охрупчивание, происходит существенное снижение пластичности и трещиностойкости материала. Эти изменения требуют своевременной прогнозной оценки.

Получение экспериментальных данных по влиянию нейтронного облучения высокой интенсивности и теплового старения на изменение физико-механических свойств возможно при дооблучении образцов металла 10X18H9 из отработавшего пакета-имитатора в составе материаловедческой сборки. При этом должны быть достигнуты значения параметров радиационного повреждения (флюенс нейтронов, повреждающая доза) и температура, аналогичные пара-

метрам, достигнутым на незаменяемых элементах, в частности на нейтронном отражателе, за 60 лет.

Полученные результаты испытаний позволяют оценить степень радиационного охрупчивания и температурного старения металла нейтронного отражателя РУ БН-600 при продлении эксплуатации до 60 лет. Облучение материаловедческой сборки с образцами металла пакета-имитатора № 4 запланировано в период 2025–2030 гг.

### ОПЫТ ОБЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ СБОРОК

На реакторе БН-600 накоплен большой опыт по облучению материаловедческихборок разной конструкции [4]. Среди них можно выделить два основных типа:

- материаловедческая сборка с выемным контейнером и 96 урановыми твэлами, устанавливаемая в ячейку ЗМО (МС с образцами из 12 % хромистых сталей, МС с образцами из ФМ-сталей, МС с образцами из ДУО-сталей). Для размещения материаловедческих образцов из штатной ТВС ЗМО изымается часть твэлов в центральной части пучка, а в освобожденное место помещается цилиндрический контейнер с образцами;
- материаловедческая сборка без выемного контейнера при отсутствии урановых твэлов, устанавливаемая в ячейку БЗВ (МС с образцами из ПТО). Для размещения образцов полностью используется все внутреннее пространство чехловой трубы МС.

Поперечное сечение материаловедческихборок разного типа представлено на рис. 1 и 2.

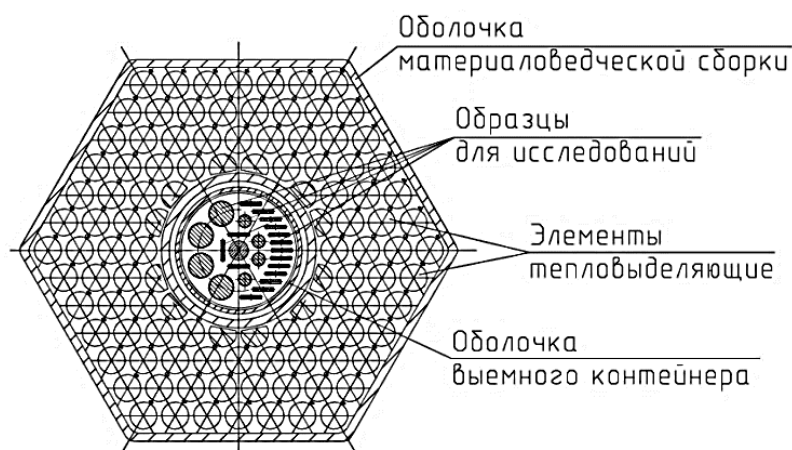


Рис. 1. Поперечное сечение материаловедческой сборки с выемным контейнером

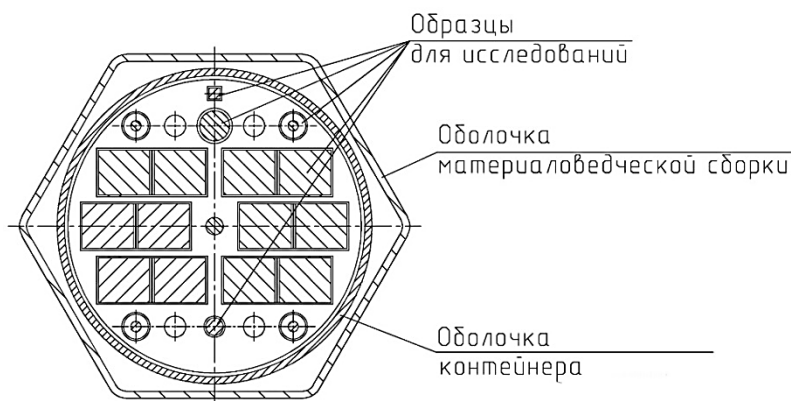


Рис. 2. Поперечное сечение материаловедческой сборки без выемного контейнера

### КОНСТРУКЦИЯ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОЙ СБОРКИ

За основу конструкции МС с образцами металла пакета-имитатора принимается опыт разработки МС с образцами из металла промежуточного теплообменника БН-600, извлеченного из реактора в 2006 г. [5]. МС-ПТО установлена на облучение в боковую зону воспроизводства БН-600 в 2021 г. с целью получения экспериментальных данных по влиянию нейтронного облучения высокой интенсивности и теплового старения на изменение физико-механических свойств конструкционных материалов, из которых изготовлены подпорка и коллекторы реактора БН-600.

Конструкция материаловедческой сборки по наружной конфигурации аналогична конструкции штатной ТВС БЗВ реактора БН-600. Корпус МС состоит из средней части и хвостовика. Средняя часть представляет собой чехловую шестигранную трубу, к торцам которой присоединены при помощи сварки верхний и нижний переходники. В чехловой трубе расположены нижний утяжелитель, прикрепленный с помощью штифтов к нижнему переходнику, и 16 стальных стержней. Хвостовик крепится на резьбе к нижнему переходнику и обеспечивает запитку сборки теплоносителем и ее установку в гнездо коллектора.

Съемная головка сборки с контейнерами с образцами состоит из собственно головки и трех навесных элементов – верхнего контейнера с образцами, утяжелителя, нижнего контейнера с образцами. Все указанные элементы закреплены последовательно один под другим с помощью узлов сцепления, состоящих из головок навесных элементов и захватных втулок, размещенных на нижних концах вышерасположенных элементов.

Головка сборки обеспечивает сцепление МС с устройствами системы перегрузки при перемещении сборки по транспортно-технологическому тракту. Контейнер представляет собой трубу, в которой размещены по две кассеты с материаловедческими образцами из металла пакета-имитатора. По конструкции кассеты для образцов состоят из стержня, двух заглушек (верхняя и нижняя) и двух дистанционирующих пластин, в пазы которых вставляют материаловедческие образцы. Утяжелитель представляет собой массивный металлический цилиндр, предназначенный для набора необходимой массы МС, гарантирующей удержание сборки в активной зоне реактора.

### ПРИНЦИПЫ РАЗМЕЩЕНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ С МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИМИ ОБРАЗЦАМИ И УСТАНОВКИ МС В РЕАКТОР

Основными факторами при выборе места размещения МС в реакторе и контейнеров с материаловедческими образцами внутри сборки являются:

- диапазон сочетаний обеспечиваемых температур и повреждающих доз на образцы;
- размеры образцов и их количество;
- скорость набора повреждающей дозы;
- статистическая представительность результатов облучения;
- влияние установки МС на нейтронно-физические характеристики активной зоны.

Основная задача при разработке материаловедческой сборки и размещении образцов из металла 10X18Н9 в ее составе – это получение максимально близких к целевым значениям параметров: повреждающей дозы ~ 60 сна и температуры в диапазоне (450–530) °С.

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ МЕТАЛЛА В СОСТАВЕ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОЙ СБОРКИ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА БН-600

Для определения места размещения контейнеров с образцами по высоте МС с целью обеспечения требуемых условий по температуре и параметрам радиационного повреждения применяется подход, сложившийся из опыта разработок МС. Координаты размещения контейнеров по высоте МС определяются исходя из целевого значения повреждающей дозы и распределения параметра по высоте сборки.

Затем требуемые температурные условия на определенных координатах размещения образцов соотносятся с распределением температуры натрия (и образцов) по высоте материаловедческой сборки. Температурное состояние МС в большей степени определяется теплообменом с окружающими ТВС, чем собственным тепловыделением. Температура облучаемых образцов в целом соответствует температуре натрия МС на высоте их расположения, с некоторым превышением за счет собственного тепловыделения.

На основании примененного подхода предлагается следующее размещение контейнеров с образцами из металла пакета-имитатора внутри МС. Нижний контейнер с образцами размещается в районе центральной плоскости активной зоны, в области наибольшего нейтронного потока. Будут достигнуты максимальная повреждающая доза  $\sim 60$  сна, флюенс нейтронов с энергией свыше  $0.1 \text{ МэВ} \sim 1.4 \times 10^{23} \text{ см}^2$ , с учетом ранее накопленных значений параметров на пакете-имитаторе № 4 за весь период его эксплуатации в реакторе БН-600, и температура в диапазоне  $(430\text{--}470)^\circ\text{C}$ . Верхний контейнер должен размещаться в верхней части материаловедческой сборки, где будут достигаться более высокие температуры в диапазоне  $(470\text{--}530)^\circ\text{C}$ , но при этом более низкий уровень повреждающей дозы  $\sim 40$  сна.

Для выбора места установки МС с образцами из металла пакета-имитатора в активной зоне рассматривались два варианта размещения: в центральной части зоны малого обогащения, где скорость набора повреждающей дозы наибольшая, и в боковой зоне воспроизводства, где скорость набора дозы в два и более раз меньше. Выбор ячейки для установки МС обуславливается обеспечением скорости набора повреждающей дозы, которая должна быть оценена в соотношении со скоростью набора дозы в пакете-имитаторе на момент облучения в реакторе.

С учетом этого при облучении МС в ячейке ЗМО, где скорость набора дозы высокая, требу-

емые значения целевых параметров радиационного повреждения будут достигнуты за короткий срок. При установке МС в ячейку БЗВ условия облучения образцов металла будут аналогичны условиям облучения ПИ № 4 в реакторе. В этом случае целевые параметры радиационного повреждения будут достигнуты за более длительный период.

### ВЛИЯНИЕ УСТАНОВКИ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОЙ СБОРКИ НА НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРА

Для окончательного выбора места установки МС в реакторе был проведен расчетный анализ влияния сборки на нейтронно-физические характеристики активной зоны и параметры штатных сборок.

Для расчета параметров облучения материаловедческой сборки, а также для анализа влияния ее установки в активной зоне используется программный комплекс JARFR, применяемый для проектных расчетов нейтронно-физических характеристик активных зон реакторов на быстрых нейтронах в трехмерной гексагональной геометрии в многогрупповом диффузионном приближении [6]. Гексагональная расчетная модель соответствует реальной картограмме реактора. Материальные составы и их размещение в модели соответствуют конструкции сборок, в том числе и для материаловедческой сборки.

Материаловедческая сборка при размещении в активной зоне замещает соответствующую штатную сборку и поэтому влияет на эксплуатационные характеристики активной зоны, в первую очередь – на распределение тепловыделений, и запас реактивности реактора [7]. Характер влияния МС определяется отсутствием в ее составе твэлов, содержащих топливо или воспроизводящий материал.

Вносимое МС возмущение в реактивности зависит от места размещения сборки:

- установка МС в ЗМО вместо штатной ТВС с урановым обогащенным топливом приводит к снижению запаса реактивности на  $\sim 0.11 \% \Delta K/K$ ;
- установка МС в БЗВ вместо штатной ТВС с воспроизводящим материалом приводит к минимальному уменьшению запаса реактивности на  $\sim 0.0002 \% \Delta K/K$ .

С учетом располагаемого на реакторе избыточного запаса реактивности в конце микро-

кампании 0.25 %  $\Delta K/K$  снижение запаса реактивности на величину 0.11 %  $\Delta K/K$  при установке МС в ЗМО является ощутимым. При этом надо также учитывать и проведение реакторных испытаний других нештатных сборок на БН-600 в период облучения МС: ЭТВС со СНУП топливом и материаловедческих сборок, большинство из которых вносят отрицательную реактивность.

Установка МС в ЗМО оказывает незначительное влияние на значение максимальной

мощности штатных ТВС: для ТВС ЗМО – уменьшается на  $\sim 1\%$ , для ТВС ЗСО – увеличивается на  $\sim 0.1\%$ , для ТВС ЗБО – увеличивается на  $\sim 0.4\%$ . При установке МС в БЗВ мощность штатных ТВС во всех зонах обогащения не меняется.

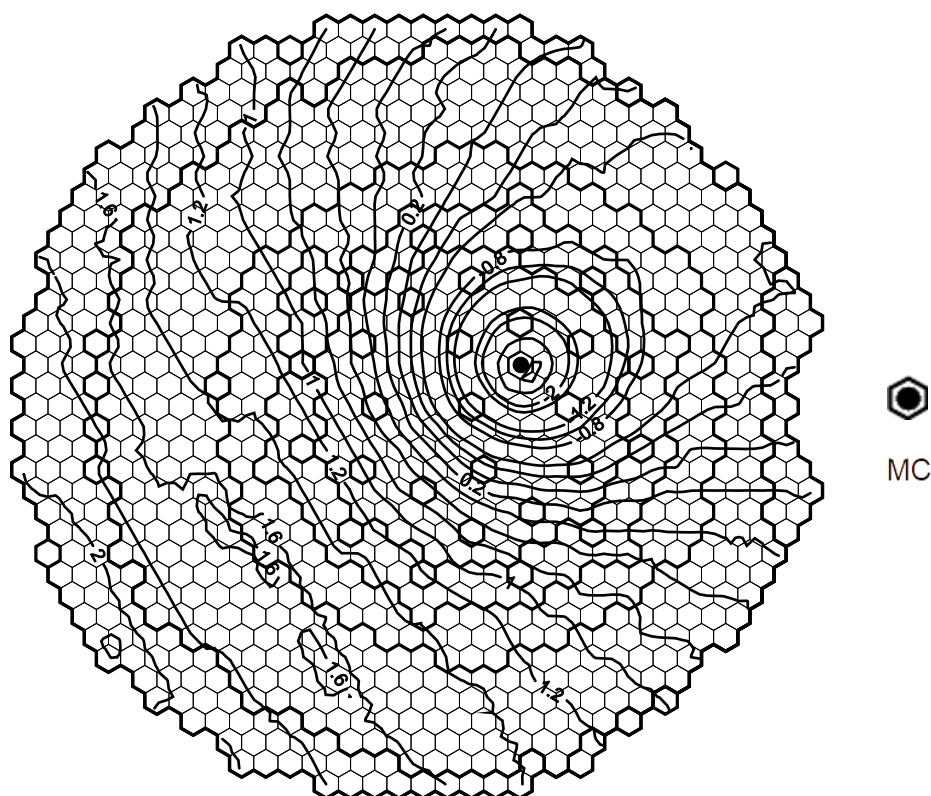
Влияние МС на окружающие сборки в зависимости от места размещения показано в табл. 1.

**Таблица 1.** Влияние МС на параметры окружающихборок в зависимости от места установки

Параметр	Относительное изменение параметра при установке МС, %	
	в ЗМО	в БЗВ
Максимальная повреждающая доза	$(-5.5) \div (-3.5)$	$(-0.4) \div (+2.9)$
Мощность ТВС	$(-0.8) \div (-0.6)$	$(+1) \div (+10)$

Снижение мощности в окружающихбороках при установке МС в ЗМО с учетом смягчения нейтронного спектра составляет не более 1 %. При установке МС в БЗВ мощность окружающихборок возрастает на  $1 \div 10\%$ , что соответствует возмущению нейтронного потока.

Возмущение плотности нейтронного потока при установке МС в ЗМО и БЗВ показано в линиях равного уровня на рис. 3 и 4.



**Рис. 3.** Возмущение плотности нейтронного потока при установке МС в ЗМО, % отн.

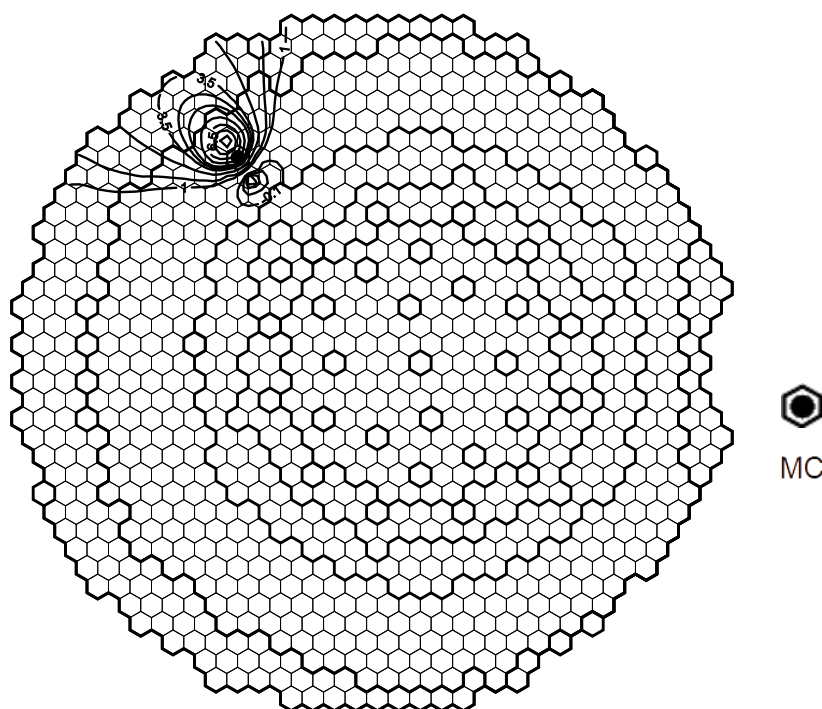


Рис. 4. Возмущение плотности нейтронного потока при установке МС в БЗВ, % отн.

Из рисунков видно, что изменение плотности потока нейтронов при установке материаловедческой сборки в ЗМО изменяется незначительно от  $-2\%$  отн. в прилегающих сборках до  $+2\%$  отн. в отдаленных сборках. С учетом минимального запаса по теплонапряженности в топливных сборках упомянутый подъем рассматривается как нежелательный. При установке сборки в БЗВ наблюдается локальный подъем в распределении плотности нейтронного потока – до  $\sim 10\%$  отн. в ТВС БЗВ, расположенных за рассматриваемой МС. Для ТВС БЗВ, характеризующихся обычным примерно четырехкратным изменением тепловыделения по ходу их кампа-

нии и принципиальной возможностью изменения режима их эксплуатации, указанное возмущение принято допустимым.

В совокупности с описанным выше влиянием установки МС на запас реактивности реактора и параметры штатных ТВС было принято окончательное решение о выборе места размещения МС в ячейке бокового экрана.

При этом эффективность стержней СУЗ, эффекты и коэффициенты реактивности не изменяются. Следовательно, нормативные требования по безопасности реактора БН-600 будут выполняться.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного анализа по влиянию установки МС на нейтронно-физические характеристики активной зоны и для достижения требуемых условий облучения образцов металла пакета-имитатора материаловедческая сборка должна устанавливаться в БЗВ реактора БН-600.

При этом будут достигнуты целевые значения параметров радиационного повреждения: повреждающая доза на образцы металла пакета-имитатора  $\sim 60$  сна и флюенс нейтронов с энергией свыше  $0.1 \text{ МэВ} \sim 1.4 \times 10^{23} \text{ см}^2$ , необходи-

мые для обоснования сохранения работоспособности нейтронного отражателя при дополнительном продлении срока эксплуатации реактора БН-600 до 60 лет. Температурные условия облучения образцов будут воспроизводиться в диапазоне температур  $(430\text{--}530)^\circ\text{C}$  при выбранном размещении контейнеров с образцами.

Установка материаловедческой сборки вместо штатной ТВС БЗВ не приводит к существенным изменениям в распределении плотности нейтронного потока и, соответственно, не изменяет условия эксплуатации штатных ТВС, не оказывает влияния на максимальный запас реактивности реактора. Нормативные требования по безопасности реактора выполняются.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ опыта эксплуатации реактора БН-600 в период с 2010 года и достигнутый уровень надежности оборудования / Б.А. Васильев, А.И. Староверов, И.А. Былов, М.Р. Фаракишин, А.В. Керекеша // Сб. тезисов докладов X Межд. научно-техн. конф. «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». Москва, 25–27 мая, 2016. С. 43–44.

2. Разработка методологии и обоснование продления срока эксплуатации корпуса и незаменяемых внутрикорпусных элементов реактора БН-600 до 45 лет / Б.А. Васильев, О.Ю. Виленский, В.Б. Кайдалов, Ю.Л. Каманин, Б.З. Марголин, А.Г. Гуленко // Научно-техн. журн. «Известия вузов. Ядерная энергетика». 2011. № 1 С. 32–43.

3. Материаловедческая сборка реактора БН-800 / Д.М. Максимцев, М.А. Губырин, А.И. Староверов, А.В. Салеев. Сб. тезисов докладов XI Межд. научно-техн. конф. «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». Москва, 23–24 мая, 2018. С. 31–32.

4. Материаловедческие сборки для высокодозного и высокотемпературного облучения конструкционных материалов в реакторе БН-600 / С.А. Воронов, А.З. Казанцев, О.В. Мишин, М.Р. Фаракишин // Сб. докладов II Российской конференции «Материалы ядерной техники» / Агой, 19–23 сентября, 2006, 2005. 2006. Вып. 2(67). С. 371–389.

5. Максимцев Д.М. Материаловедческая сборка реактора БН-600 // Материалы конкурса «Инновационный лидер атомной отрасли», 2019.

6. Ярославцева Л.Н. Комплекс программ JAR для расчета нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика и техника ядерных реакторов. 1983. Вып. 8(37). С. 41–43.

7. Обеспечение условий облучения нитридного топлива в составе ЭТВС реактора БН-600. Б.А. Васильев, М.Р. Фаракишин, С.Б. Белов, А.А. Радионычева // Сб. докладов IV Межд. научно-техн. конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики». Москва, 27–30 сентября, 2016. М.: изд-во АО «НИКИЭТ», 2016. Т. 1. С. 274–280.

---

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI», 2022, vol. 11, no. 5, pp. 379–386

---

## ENSURING IRRADIATION CONDITIONS FOR METAL SPECIMENS WITHIN A MATERIALS SCIENCE ASSEMBLY TO VALIDATE THE BN-600 OPERATION LIFE EXTENSION

Ye.S. Kirilova\*, A.A. Radionychева\*\*, M.R. Farakshin\*\*\*

Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, 603074, Russia

\*e-mail: kirilova\_es@okbm.nnov.ru,

\*\*e-mail: radionychева\_aa@okbm.ru,

\*\*\*e-mail: farakshin@okbm.nnov.ru

Received December 9, 2022; revised December 9, 2022; accepted December 13, 2022

In order to extend the operation life of the BN-600 reactor, it is necessary to validate operability of the permanent reactor elements – including the neutron reflector – that operate under the conditions with high damaging doses and high temperatures. It can be done through irradiating metal of simulating package inside a materials science assembly inserted in BN-600. The paper describes basic characteristics of the assembly, including design features and irradiation parameters. Described are the basic principles of selecting the location for the materials science assembly in the reactor and for specimens inside the assembly in order to ensure the required irradiation conditions for the metal specimens. With comparing the materials science assembly locations in the reactor core and in the radial blanket, the effect is discussed that the materials science assembly location has upon the characteristics of the reactor standard fuel assemblies and upon the neutron flux field. To calculate the irradiation parameters and the effect that the location has upon the materials science assembly, the same methods and programs are used as for the reactor core design work. The effect of the materials science assembly upon the reactor core neutronic characteristics has been shown to be minimum when the assembly is inserted in the radial blanket.

**Key words:** BN-600, reactor core, operation life extension, materials science assembly, simulator package, neutronic characteristics, neutron flux field, damaging dose, neutron fluence, temperature.

## REFERENCES

1. Vasiliev B.A., Staroverov A.I., Bylov I.A., Farakshin M.R., Kereksha A.V. [Analysis of the Operating Experience with BN-600 within the Period from

2010, and the Achieved Equipment Reliability Level]. Sb. tezisev dokladov desyatoj mezhd. nauchno-tekhn. konf. «Bezopasnost', effektivnost' i ekonomika atomnoj energetiki», Moskva, 25–27 maya, 2016. [Book of Ab-



stracts of the Tenth International Scientific and Technical Conference «Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Power Industry», Moscow, May 25–27, 2016]. P. 43–44 (in Russian).

2. *Vasiliev B.A., Vilensky O.Yu., Kaydalov V.B., Kamanin Yu.L., Margolin B.Z., Gulenko A.G.* Razrabotka metodologii i obosnovanie prodleniya sroka ekspluatatsii korpusa i nezamenyaemykh vnutrikorpusnykh elementov reaktora BN-600 do 45 let. [Developing the Methodology for and Validation of the Operation Life Extension to 45 Years for the BN-600 Reactor Vessel and Permanent In-Vessel Elements]. Science and Technology Magazine. Izvestiya Vuzov. (News of Higher Education Institutions). Yadernaya Energetika (Nuclear Energy). 2011. No. 1. P. 32–43 (in Russian).

3. *Maksimtsev D.M., Gubyrin M.A., Staroverov A.I., Salyaev A.V.* Materialovedcheskaya sborka reaktora BN-800. [Materials Science Assembly for the BN-800 Reactor]. Sb. tezisov dokladov odinnadcatoy mezhd. nauchno-tekhn. konf. «Bezopasnost', effektivnost' i ekonomika atomnoj energetiki» (Moskva, 23–24 maya 2018). [Book of Abstracts of the Eleventh International Scientific and Technical Conference «Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Power Industry», Moscow, May 23–24, 2018]. 2018. P. 31–32.

4. *Voronov S.A., Kazantsev A.Z., Mishin O.V., Farakshin M.R.* Materialovedcheskie sborki dlya vysokodoznogo i vysokotemperaturnogo oblucheniya konstrukcionnykh materialov v reaktore BN-600 [Materials Science Assemblies for High-Dose, High-Temperature Irradiation of Structural Materials in the

BN-600 Reactor]. Sb. dokladov Vtoroj Rossijskoj konferencii «Materialy yadernoj tekhniki» (Agoj, 19–23 sentyabrya 2005). [Proceedings of the Second Russian Conference «Nuclear Engineering Materials», Agoy, September 19–23, 2005]. 2006. Is. 2(67). P. 371–389 (in Russian).

5. *Maksimtsev D.M.* Materialovedcheskaya sborka reaktora BN 600. [Materials Science Assembly for the BN-600 Reactor]. Materialy konkursa «Innovacionnyj lider atomnoj otrasli» [Materials of the Contest «Innovative Leader of the Nuclear Industry»]. 2019.

6. *Yaroslavtseva L.N.* Kompleks programm JAR dlya rascheta nejtronno-fizicheskikh harakteristik yadernyh reaktorov. [JAR Software Package for Nuclear Reactor Neutronic Characteristics Analysis]. Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Ser.: Fizika i tekhnika yadernyh reaktorov [Questions of atomic science and technology. Ser.: Physics and technology of nuclear reactors]. 1983. Is. 8(37). P. 41–43 (in Russian).

7. *Vasiliev B.A., Farakshin, M.R., Belov, S.B., Radionycheva, A.A.* Obespechenie uslovij oblucheniya nitridnogo topliva v sostave ETVS reaktora BN-600 [Ensuring the Irradiation Conditions for Nitride Fuel within a BN-600 Test Fuel Assembly]. Sb. dokladov chetvertoj mezhd. nauchno-tekhn. konf. «Innovacionnye proekty i tekhnologii yadernoj energetiki» [Book of Abstracts of the International Scientific and Technical Conference «Innovative Designs and Technologies of Nuclear Power», Moscow, September 27–30, 2016) Published by NIKIET JSC], 2016. Vol. 1. P. 274–280.