



ФЭИ
РОСАТОМ

Современное научное сопровождение быстрой тематики

Тузов Александр Александрович

генеральный директор АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

директор АО «ГНЦ НИИАР»

25 июня 2021, Обнинск

Стадии развития российских технологий быстрых натриевых реакторов БН

Научный руководитель разработок:
ГНЦ РФ – ФЭИ им. А.И. Лейпунского



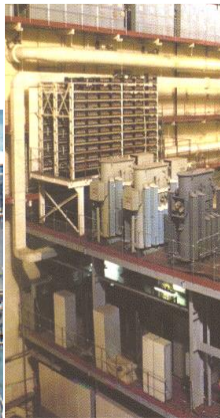
БР-5/10 (1959г.)



БОР-60 (1969г.)



БН-350 (1973г.)



БН-600 (1980г.)



БН-800 (2015г.)



БН-1200 (2030г.)

Главная особенность ядерных реакторов на быстрых нейтронах состоит в том, что в топливный цикл могут быть вовлечены запасы ^{238}U и ^{232}Th , которых в природе значительно больше, чем ^{235}U — основного топлива для реакторов на тепловых нейтронах.

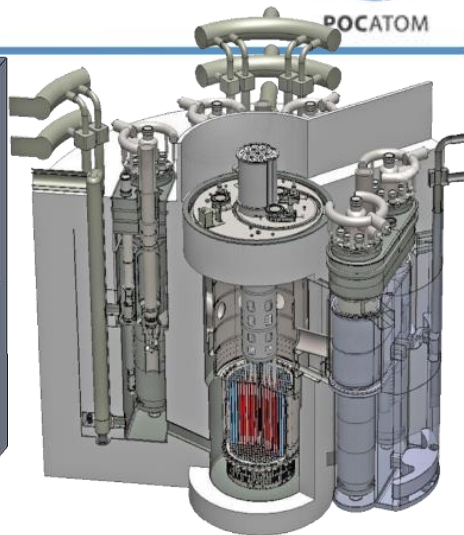
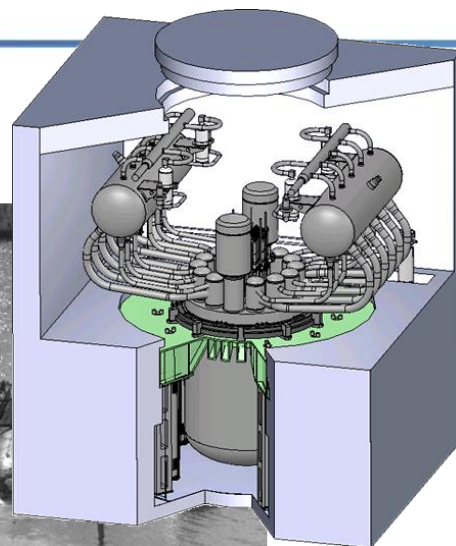
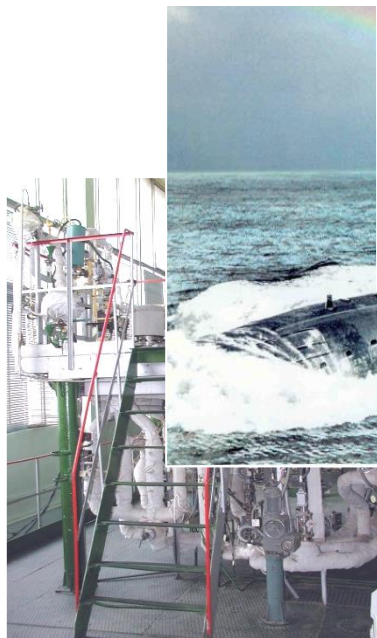
Быстрые реакторы способны решить проблему ОЯТ тепловых реакторов и обеспечить безопасное и устойчивое развитие ЯЭ.

Эти свойства быстрых реакторов наиболее масштабно проявляются при замыкании ядерного топливного цикла атомной энергетики

Стадии развития российской технологии реакторов с ТЖМТ (Pb-Bi, PB)



РОСАТОМ



СВБР-100
(после 2026г.)

БРЕСТ-ОД-300
(после 2026 г.)

АПЛ-705 серийные
(1976-1996гг.)

АПЛ-705
опытная (1971г.)

Опытная АПЛ проекта 645
(1963г.)

Pb-Bi стенд (1951г.)

Основные направления деятельности ФЭИ и НИИАР по быстрой тематике



- Системные исследования по научно-техническому обоснованию стратегии развития двухкомпонентной ЯЭ с быстрыми и тепловыми реакторами в ЗЯТЦ
- Научное руководство при сопровождении промышленной эксплуатации реакторов БН-600 и БН-800
- Научное руководство и расчетно-экспериментальное обоснование физики, теплогидравлики и безопасности проектов БН-1200М, МБИР и БРЕСТ-ОД-300
- Отработка технологий переработки ОЯТ БР на опытно-демонстрационном уровне.
- Разработка, расчетно-экспериментальное обоснование работоспособности и изготовление твэл, ТВС и элементов конструкции БР с различными видами топлива и конструкционными материалами
- Разработки в области константного обеспечения и кодов в обоснование НФХ, а также ядерной, радиационной и технологической безопасности реакторов
- Инновационные проекты и новые продукты:
 - БН-ГТ с замкнутым газотурбинным циклом
 - Высокотемпературный БН-ВТ
 - Реактор-выжигатель МА с металлическим топливом
 - Производство изотопов и водорода

Современная реакторная и внереакторная экспериментальная база быстрых реакторов



Реакторная экспериментальная база

- Исследовательский реактор БОР-60 (СМ-3, МИР.М1)
- Исследовательский реактор МБИР (сооружается, пуск - 2028 год)
- Импульсный реактор БАРС-6
- Комплекс БФС, включающий два реактора «нулевой» мощности
- Ресурсные испытания опытных твэлов и КМ в БН-600

Внереакторная экспериментальная база

Для обоснования теплогидравлики и технологии теплоносителей в ГНЦ РФ – ФЭИ используются 62 стенда и установки с различными теплоносителями:

- ЖМТ стенды с теплоносителями Na, Na-K, K, Li, Cs, Pb-Bi, Pb
- Воздушные и гидродинамические стенды

Экспериментальная база ЗЯТЦ

- Радиохимический комплекс НИИАР (зд. 119, 120)
- Химико-технологический комплекс НИИАР (зд. 180)
- ПРК (сооружается)

Материаловедческая экспериментальная база

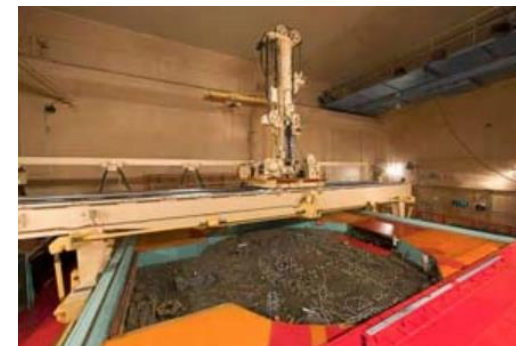
- Материаловедческий комплекс горячих камер НИИАРа
- Комплекс имитационных исследований на ускорителе тяжелых ионов ФЭИ

ГНЦ РФ – ФЭИ:

- БФС-1 (1961)
- БФС-2 (1970)
- БАРС-6 (1994)



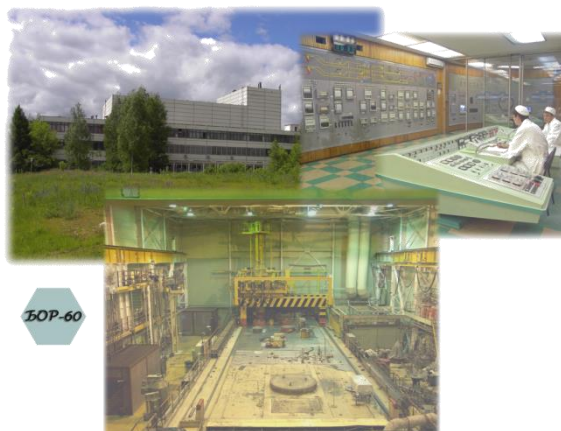
Импульсный реактор БАРС-6



БФС-2 – Самый большой реактор «нулевой» мощности в мире

ГНЦ НИИАР:

- БОР-60 (1969)
- МБИР (пуск в 2028)

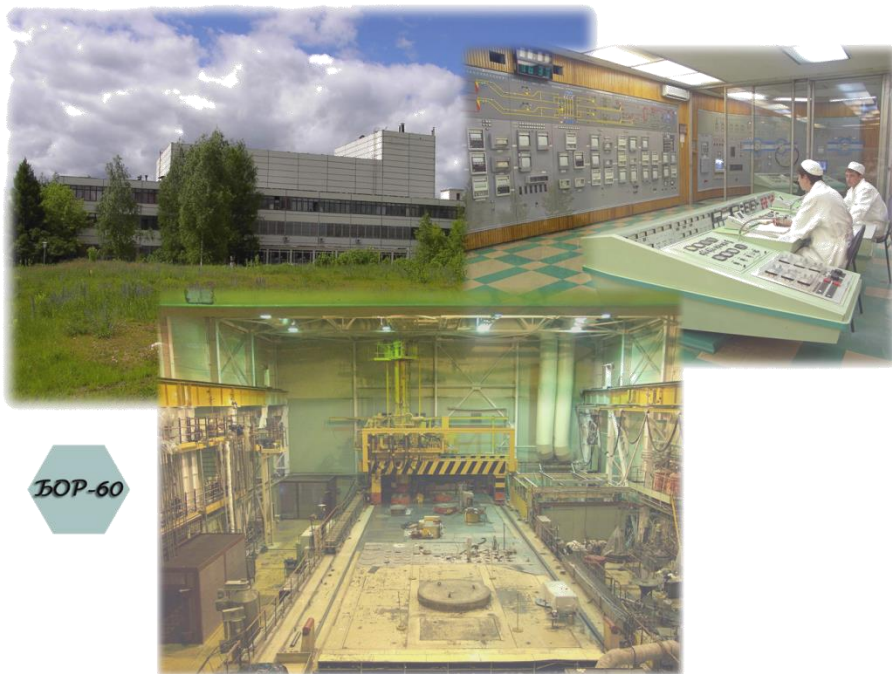


Быстрый исследовательский реактор БОР-60



Многоцелевой быстрый исследовательский реактор МБИР

Опытный реактор на быстрых нейтронах БОР-60



БОР-60

БОР-60 также используется для наработки изотопной продукции, производства электроэнергии и для теплоснабжения промплощадок АО «ГНЦ РФ НИИАР».

Реакторная установка БОР-60 предназначена для обоснования и экспериментальной проверки основных технических и технологических решений, определяющих параметры перспективных АЭС с реакторами на быстрых нейтронах.

Установка является экспериментальной базой для массовых испытаний топливных элементов различных конструкций, для испытаний топливных, поглощающих и конструкционных материалов в условиях высоких рабочих параметров натриевого теплоносителя, а также для получения опыта технологии радиоактивного натрия в условиях достаточно высоких температур, для изучения радиоактивных загрязнений теплоносителя, газа и контуров.

Многоцелевой исследовательский быстрый реактор МБИР



Приводы поворотных пробок

Корпус

ИМ СУЗ

Поворотные пробки

Преобразователь термоэлектрический

Уровнемер

ВЭК для нейтронно-активационного анализа

Активная зона



Горизонтальный экспериментальный канал

Вертикальный экспериментальный канал (ВЭК)

Тепловыделяющая сборка

Ячейка внутриреакторного хранилища

Рабочий орган СУЗ

Материаловедческий/радионуклидный пакет

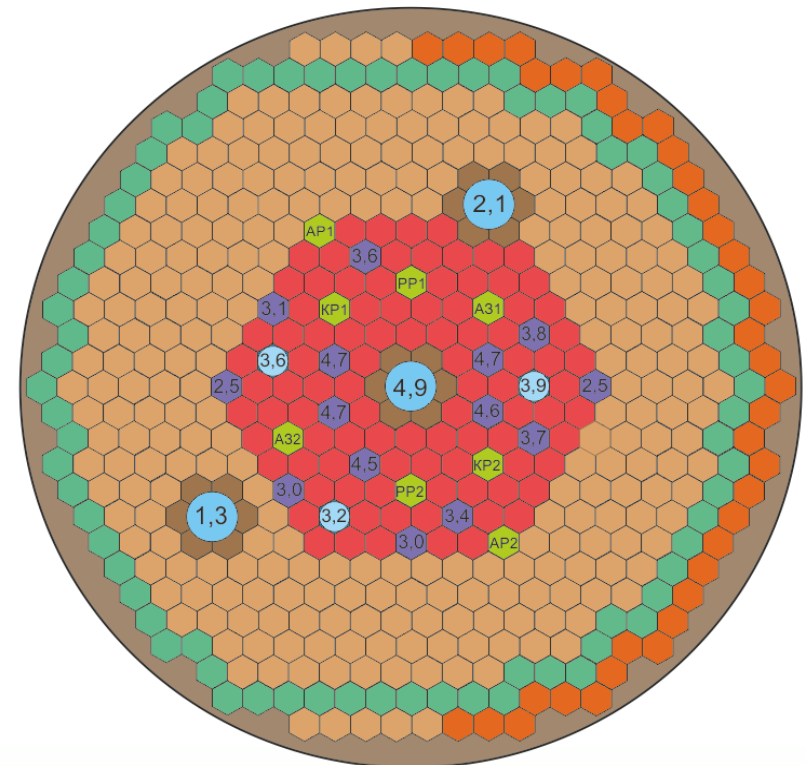
Сборка защиты внутриреакторного хранилища

Экспериментальный канал

Сборка бокового экрана

Петлевой канал

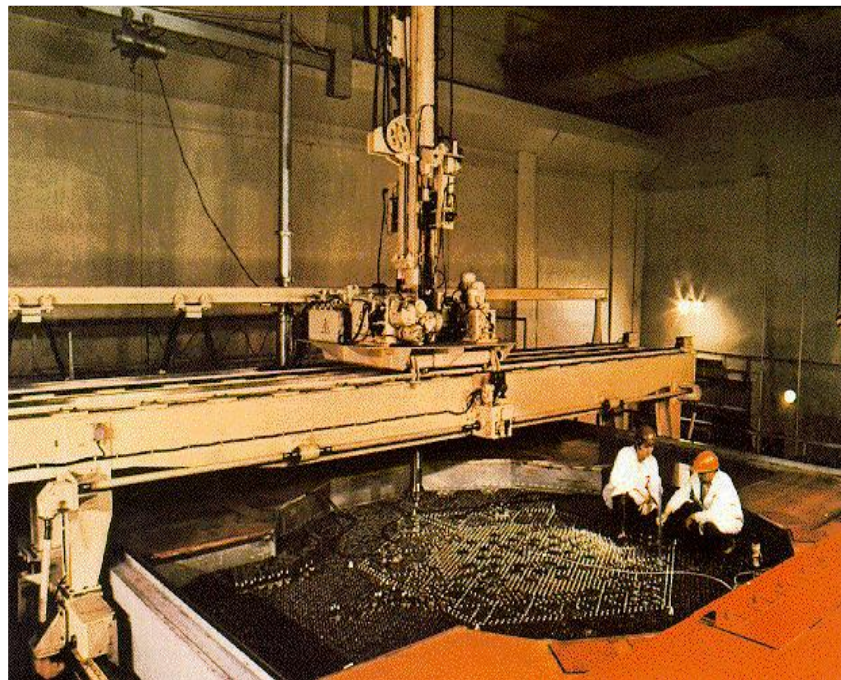
Плотность потока в ячейках указана с учетом коэффициента $10^{15} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$



- два реактора нулевой мощности
- экспериментальные исследования физики быстрых реакторов
- конструирование и оптимизация активных зон
- «физика» ЗЯТЦ и минорных актинидов
- утилизация оружейного плутония
- «облагораживание» изотопного состава энергетического плутония из МОКС ОЯТ тепловых реакторов
- решение проблем безопасности быстрых реакторов

После завершения техпереворужения в 2016 г. на БФС-1 выполнено моделирование характеристик реакторов ASTRID и CEFR.

Ведутся работы по МБИР и БН-800 с полной МОКС загрузкой. На очереди – БРЕСТ ОД-300 и БН-1200!



Экспериментальные стенды ФЭИ (1/2)

Комплекс стендов предназначен для проведения исследований и испытаний оборудования в обоснование проектно-конструкторских решений и безопасности реакторных установок с реакторами на быстрых нейтронах и включает в себя основные экспериментальные установки:

- Теплогидравлические стенды с жидкими металлами – 6Б (Na, Na-K), СПРУТ (Na, Na-K, Pb, Pb-Bi), AP-1 (Na, Na-K), Плутон (Na), ИРС-М (Na)
- Технологические стенды – Протва -1 (Na, Na-K), Протва-2 (Na), СИД (Na, Na-K), ВТС (Na); ТТ-1М (Pb, Pb-Bi), ТТ-2М (Pb-Bi)
- Воздушные и водяные гидро- и аэродинамические стенды – СГДИ (воздух), В-2 (воздух), СГИ (вода), СИАФ-1 (воздух)



Жидкометаллический теплогидравлический стенд «6Б»



Исследования гидродинамики, теплообмена и температурных режимов в элементах активной зоны, теплообменниках «металл – металл» в номинальных и ненормальных режимах работы; испытания срабатывающих устройств пассивной аварийной защиты реакторов с натриевым теплоносителем

Жидкометаллические стенды «Протва-1» и «Протва-2»



Исследования в обоснование технологии натриевого теплоносителя, испытания устройств очистки и приборов контроля примесей в теплоносителе, изучение поведения конструкционных материалов в зоне реакции натрия с водой

Многоцелевой жидкометаллический стенд «СПРУТ»



Исследования тепловых и гидравлических характеристик парогенераторов реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями (Na, Pb)

Высокотемпературный стенд «АР-1»

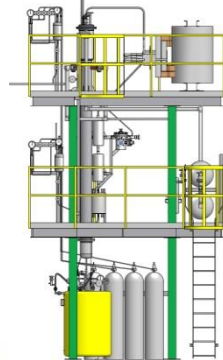
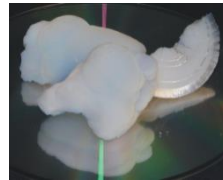
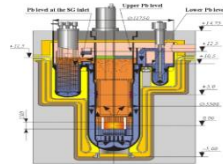
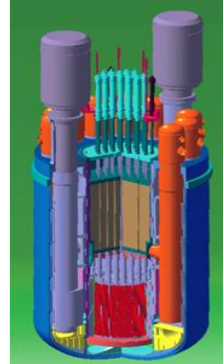


Исследования теплогидравлики в пусковых, переходных и аварийных режимах, устойчивости циркуляции и характеристик теплообмена при кипении натриевого теплоносителя

Экспериментальная база и стенды (ТТ-1М, ТТ-2М) для отработки технологии ТЖМТ Pb-Bi, Pb



- Очистка теплоносителя и контура от примесей
- Контроль и управление окислительным потенциалом теплоносителя
- Фильтрационная очистка теплоносителей
- Методы предотвращения коррозии и эрозии конструкционных материалов
- Поиск высокотемпературных конструкционных материалов (до 1000 °С) для перспективных РУ с жидкометаллическими теплоносителями
- Жидкометаллическая технология получения наноматериалов и нанопорошков
- Поисковые исследования по применению ТЖМТ в прямоконтактных технологиях переработки твердых, жидких и газообразных сред (глубокая переработка нефтепродуктов, парогенераторы, иммобилизация радиоактивных отходов, генераторы H_2 и др.)



Теплоноситель – Pb-Bi, Pb
Температура – до 600 °С;
Расход ТЖМТ – до 5 м³/ч;
Общее количество стендов и установок – 10

Обоснование и научно-техническое сопровождение эксплуатации средств технологии СТ

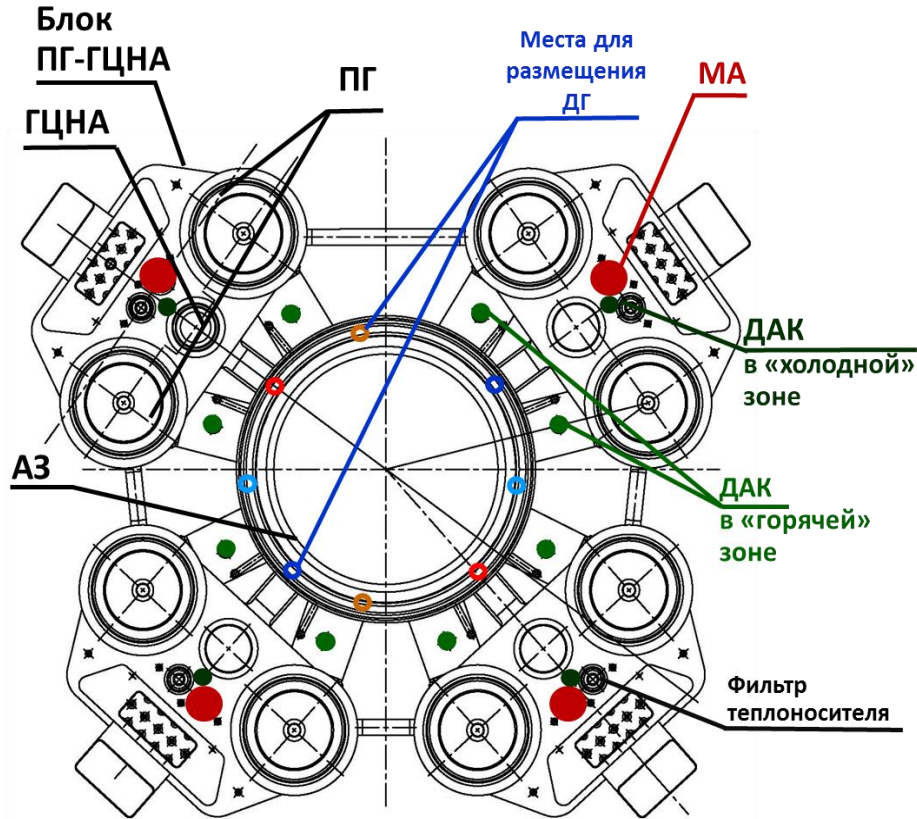


Схема размещения средств технологии свинцового теплоносителя в РУ

В теплоносителе:

- Датчики активности кислорода (ДАК) - (12 шт.).
- Массообменные аппараты (МА) - (4 шт.).
- Фильтры механической очистки теплоносителя (ФТ) - 4 шт.
- Диспергаторы газа (ДГ) - 2 шт.

В газовой системе:

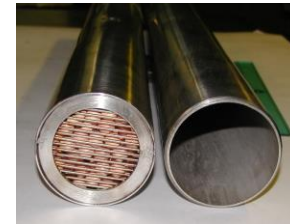
- Дожигатель водорода (ДВ) - 1 шт.
- Датчик контроля водорода (ДВГ) в защитном газе - 1 шт.
- Фильтры газовые (ГФ) – 2 шт.



Измерительный канал контроля кислорода

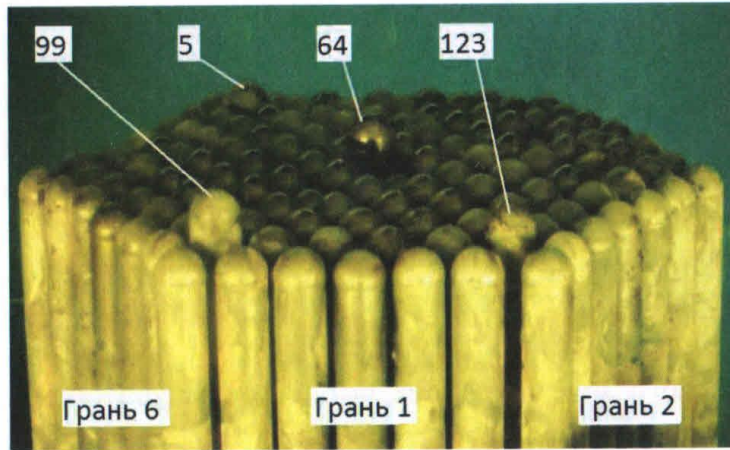


Диспергатор газа

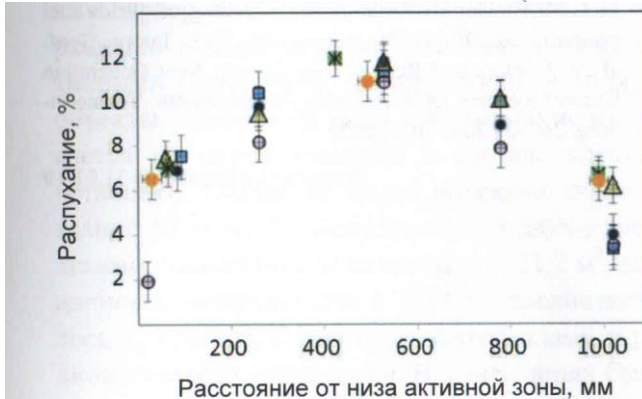


Массообменный аппарат

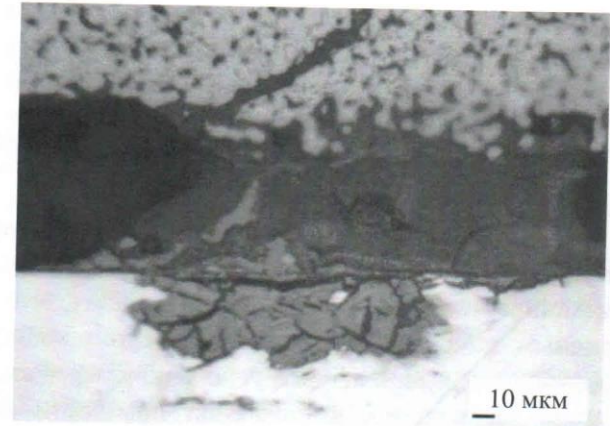
ПРИ облученных твэлов в рамках программы обоснования СНУП-топлива для РУ БРЕСТ ОД-300



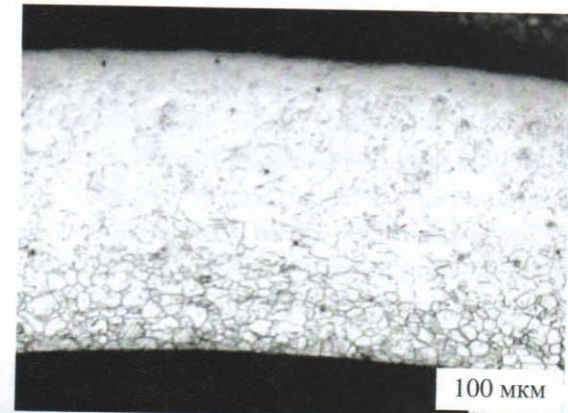
Р и с. 2. Верхний торец КЭТВС-7 после облучения (циф-



Р и с. 10. Распухание смешанного нитридного топлива в твэле № 99 (■), № 123 (●) КЭТВС-7 по гидростатическому взвешиванию, в твэле № 5 (○), № 64 (●), № 99 (■), № 123 (▲) по планиметрии



Р и с. 6. Вид язвенной коррозии на внутренней поверхности оболочки твэла № 64 КЭТВС-7



Р и с. 7. Повышенная травимость границ зерен со стороны внутренней поверхности оболочки твэла № 99 КЭТВС-6

Твэльно-топливный комплекс ФЭИ



Разработка элементов активной зоны РУ СВБР-100.
Изготовление и поставка источников нейтронов
для БН-600, ледокольных активных зон, плавучих энергоблоков (ПЭБ)

2



**Комплекс
сварки и пайки**

Разработка, изготовление и
поставка изделий для ЯЭУ
(СВБР, БН, КЯЭУ,
специальных ЯЭУ).



3

Твэльно-трубный комплекс ФЭИ



Разработка, изготовление и поставка оболочечных труб для
ЯЭУ различного назначения

4

**Стендовый комплекс для коррозионных испытаний материалов в
жидкометаллических теплоносителях**



Обоснование коррозионной стойкости в Na,
Pb-Bi, Pb материалов активных зон ОПЭБ
СВБР, БРЕСТ, БН-1200.



5



Нейтронно-физические коды

константная система – **CONSYST/БНАБ-РФ**
диффузионное приближение – **TRIGEX**
метод Монте-Карло – **ММККЕНО, ММКС**

Топливные коды
ДРАКОН, PINCOD, VIKOND

Коды переноса радиоактивности

АЛЬФА-М, SKIF, **CARE**, ВЫБРОС-БН, AERO

Теплогидравлические коды

MIF, TWSG, LLEAK, SLEAK,
BOX2000, MASKA-LM

Коды для расчета радиационной
безопасности: **DORT, TORT**

Интегральные коды безопасности

COREMELT , **КУПОЛ-БР**

Научное сопровождение: **BNCODE**



Аттестован



Проходит аттестацию/планируется к аттестации

Мировое лидерство в научном обеспечении технологического развития крупномасштабной двухкомпонентной атомной энергетики с реакторами на быстрых и тепловых нейтронах на основе замкнутого ядерного топливного цикла