

Государственное научное учреждение «Объединенный институт
энергетических и ядерных исследований -Сосны»
Национальной академии наук Беларуси

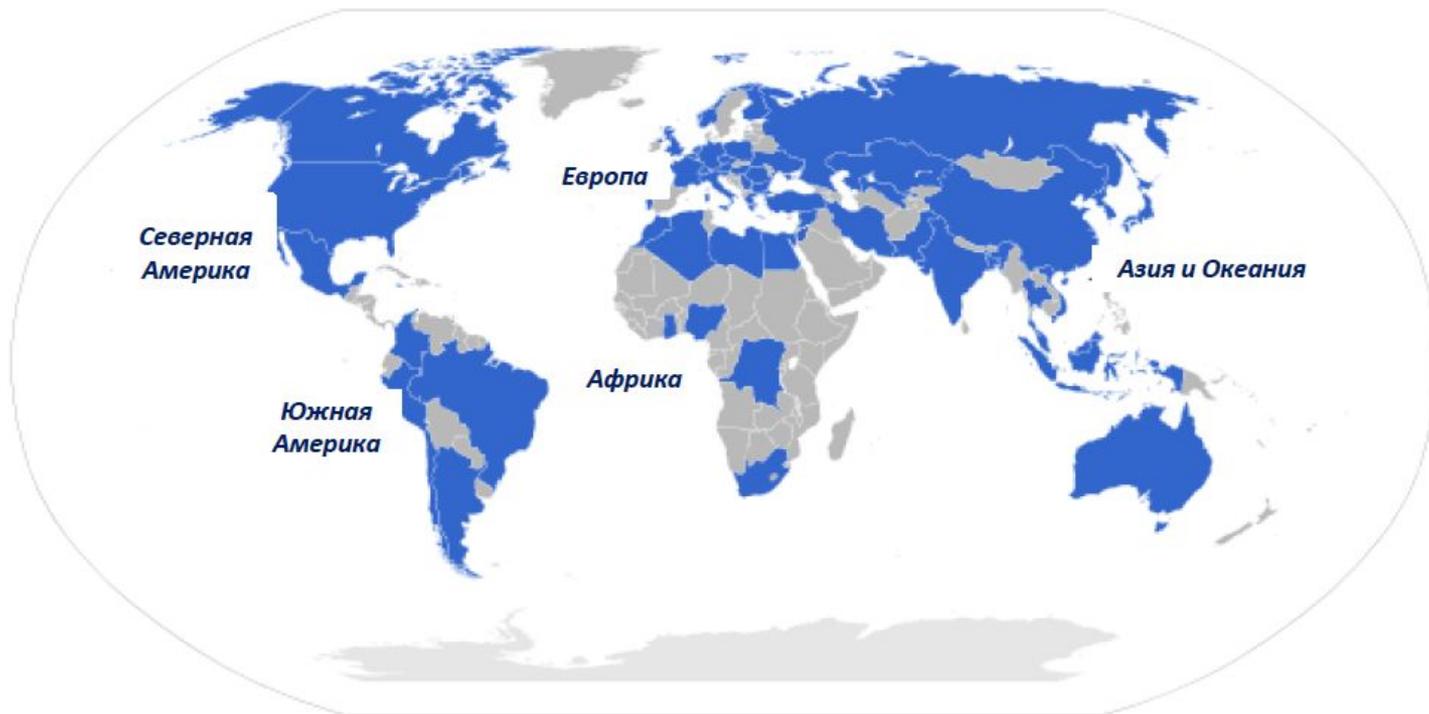
О необходимости разработки и строительства в Республике Беларусь исследовательского ядерного реактора

А.В.Кузьмин, С.Н.Сикорин, Т.К.Григорович

Состояние исследовательских реакторов в мире

По данным Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) в настоящее время в мире эксплуатируется 246 исследовательских ядерных реакторов. 19 исследовательских реакторов находятся в режиме временного останова, а 140 – в режиме длительного останова. 343 исследовательских реактора выведены из эксплуатации. Продолжается строительство 6 новых исследовательских реакторов. Разработаны проекты и начаты строительные работы на площадках 12 новых исследовательских реакторов. Кроме того, рассматривается возможность строительства 6 новых и модернизация ряда существующих исследовательских реакторов.

Распределение исследовательских реакторов по странам

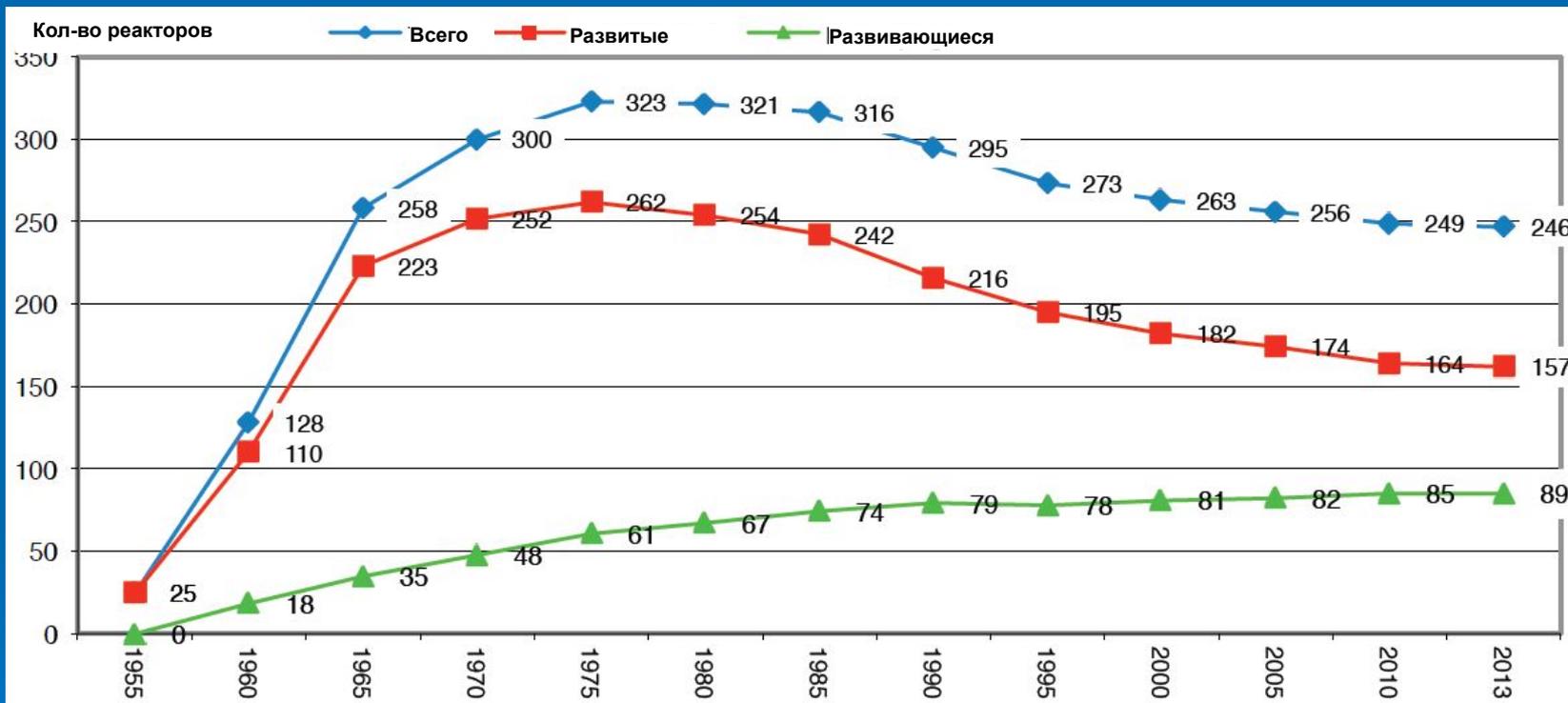


Другие развивающиеся страны Германия Франция Япония Россия США Другие развитые Канада Китай



Сведения представлены по данным МАГАТЭ по состоянию на 2014г.

Количество исследовательских реакторов в развитых и развивающихся странах



Сведения представлены по данным МАГАТЭ по состоянию на 2014г.

Новые проекты исследовательских реакторов

Сведения по данным МАГАТЭ по состоянию на 2015г.

Фаза 1 (подготовительные работы) Всего: 17	Фаза 2 (предпроектные и проектные работы) Всего: 6	Фаза 3 (строительство) Всего: 6
Азербайджан	Беларусь	Аргентина
Бангладеш	Боливия	Бразилия
Эфиопия	Бельгия	Франция
Гана	Нидерланды	Индия
Кувейт	США	Южная Корея
Ливан	Вьетнам	Россия
Малайзия		
Монголия		
Иордания		
Таджикистан		
Нигерия		
Саудовская Аравия		
Южная Африка		
Судан		
Таиланд		
Тунис		
Танзания		

Назначение исследовательских реакторов

Исследовательские реакторы предназначены для выполнения следующих работ:

- ▣ **Физические исследования.** Формирование выведенных потоков нейтронного и гамма-излучения в экспериментальных каналах (вертикальных, горизонтальных или наклонных), проходящих через отражатель и радиационную защиту. Объекты облучения и экспериментальное оборудование находятся за пределами радиационной защиты реактора.
- ▣ **Радиационное материаловедение.** Основные экспериментальные элементы - вертикальные каналы, позволяющие доставлять объекты облучения в области активной зоны и отражателя.
- ▣ **Инженерные исследования.** Использование автономных контуров охлаждения для поддержания требуемых режимов испытания новых инженерных решений для ТВЭЛ, ТВС и других элементов конструкции реакторов. Проведение натурных испытаний в условиях, максимально приближенных к реальным.

Назначение исследовательских реакторов (продолжение)

- ▣ **Нейтронная физика**, нейтронно–активационный анализ, неразрушающий контроль качества изделий, неразрушающий анализ состава материалов, нейтронная радиография и другие нейтронные методы.
- ▣ **Радиационная химия**, исследование стойкости синтетических материалов в мощных полях нейтронного и гамма-излучений и т.п.
- ▣ **Производство радионуклидов**, включая медицинские изотопы и изотопы трансураниевых элементов.
- ▣ **Радиобиологические и медицинские исследования**, включая обработку продукции сельского хозяйства и проведение медицинской диагностики и терапии.
- ▣ **Обучение и подготовка персонала** в областях: физика реакторов; безопасность реакторов; ядерная и радиационная безопасность; динамика реактора, а также для развития навыков и компетенций в области экспериментальных методов ядерной физики и управления сложными объектами.
- ▣ **Другие.**

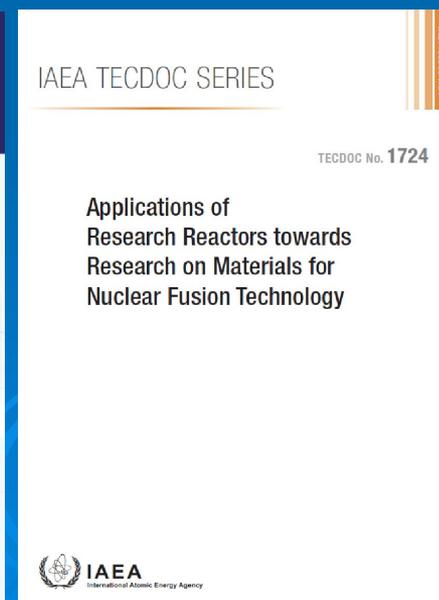
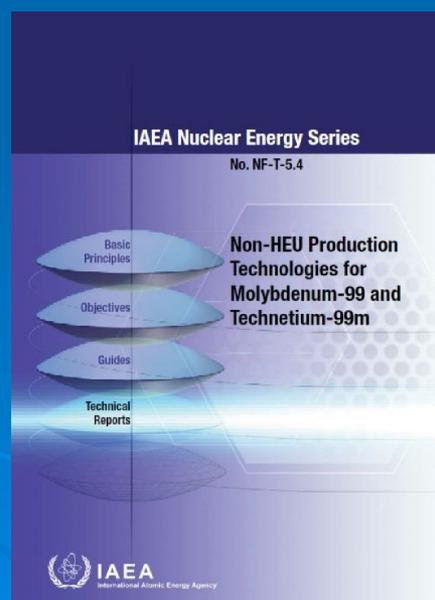
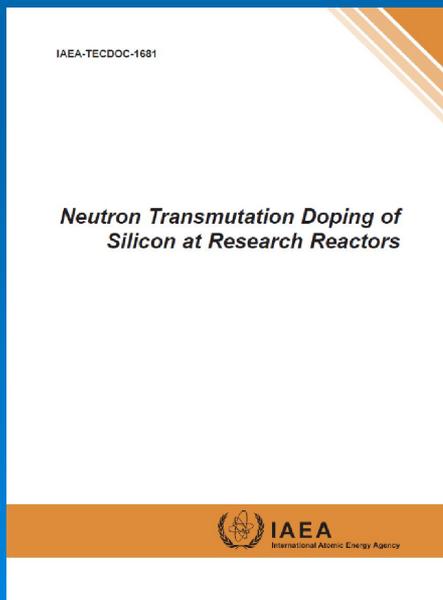
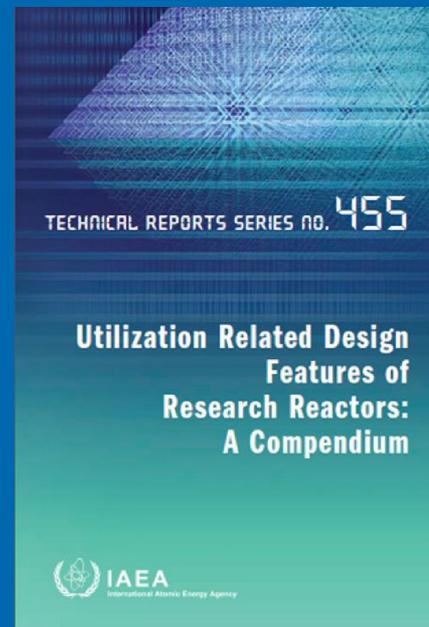
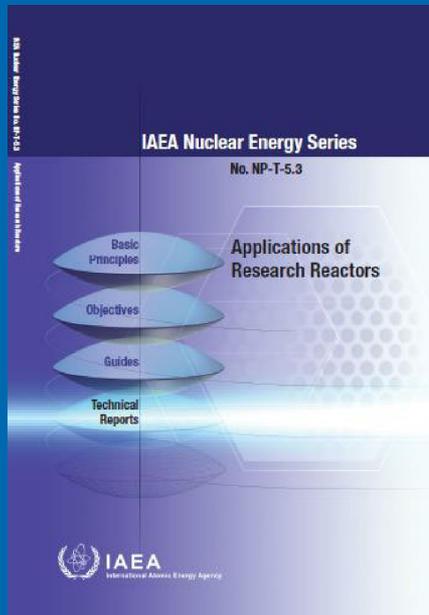
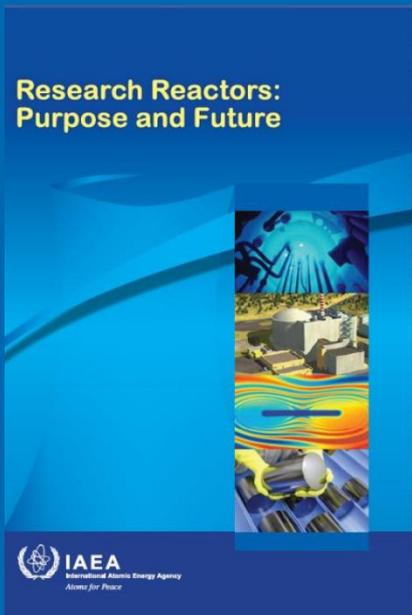
Применение исследовательских реакторов в мире

Тип применения	Число соответствующих исследовательских реакторов	Государства-члены, в которых находятся используемые установки
Производство радиоизотопов	100	44
Нейтронное рассеивание	53	35
Нейтронная радиография	74	41
Облучение материалов/топлива	85	30
Обработка драгоценных камней	22	13
Микроэлектроника (легирование кремния)	31	20
Обучение/подготовка кадров	178	55
Нейтронно-активационный анализ	129	53
Геохронология	26	22
Измерения ядерных данных	42	17
Бор–нейтрон–захватная терапия	19	13
Другие применения ¹	141	38

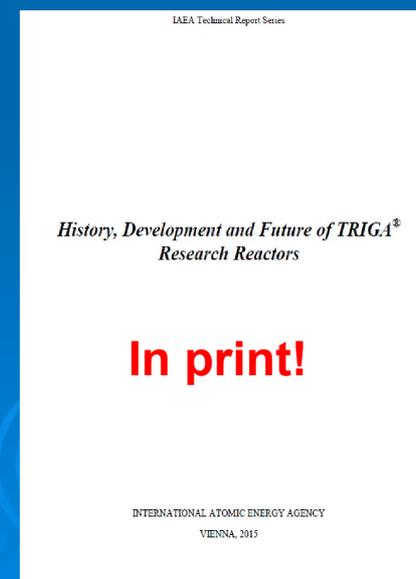
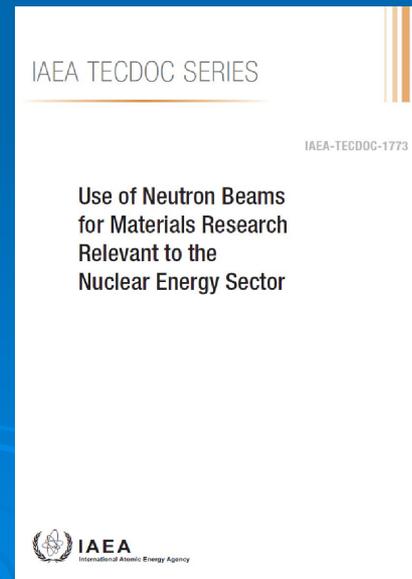
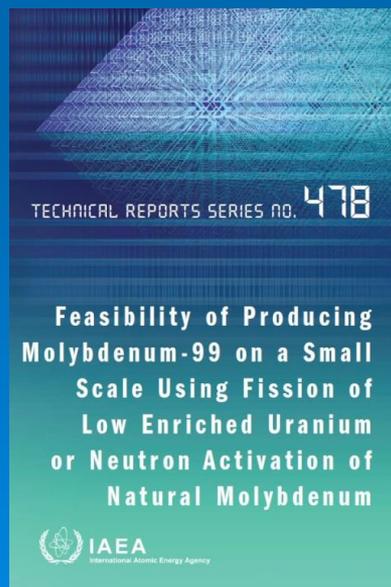
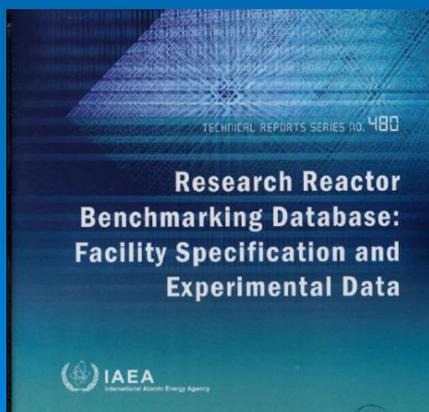
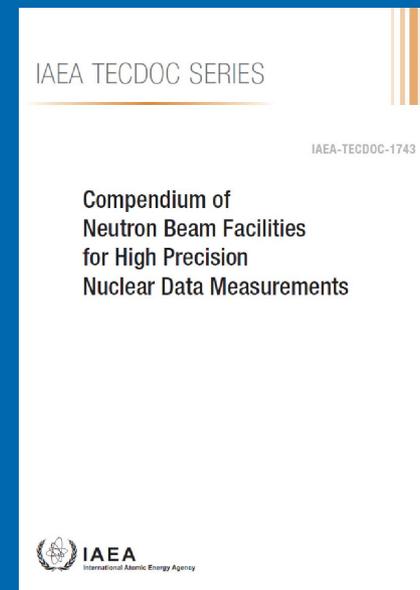
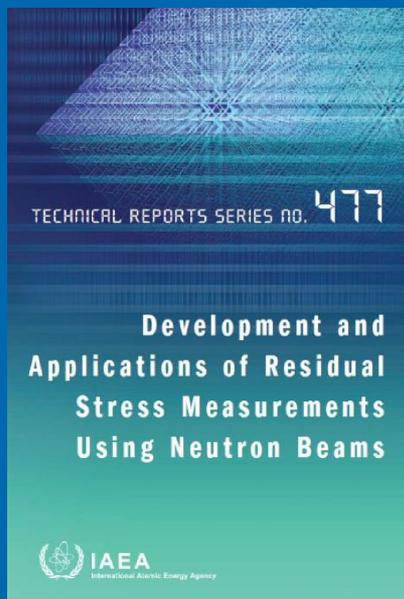
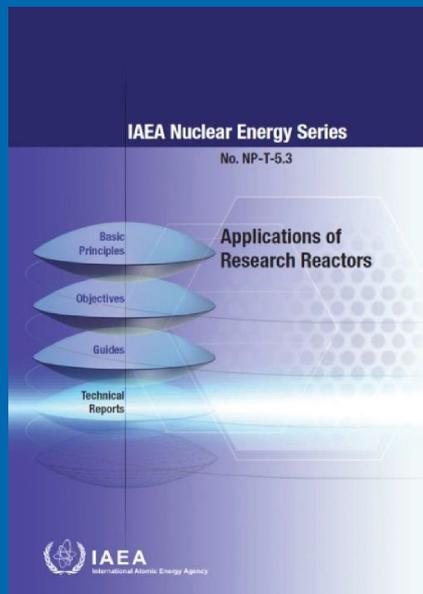
Примечание. По состоянию на 2014г. из 283 рассмотренных в таблице исследовательских реакторов 246 - в эксплуатации, 19 - временно остановлены, 6 - в стадии строительства и 12 – запланированы.

¹ К другим применениям относятся калибровка и тестирование контрольно-измерительных приборов и дозиметрия, эксперименты с биологической защитой, эксперименты по реакторной физике и семинары по программам связей с общественностью.

Рекомендации МАГАТЭ по исследовательским реакторам



Рекомендации МАГАТЭ по исследовательским реакторам



Исследовательский реактор ИРТ-2000 (ИРТ-М) Республики Беларусь

В 1962г. на существующей научно-исследовательской площадке ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси был введен в эксплуатацию исследовательский реактор ИРТ-2000. В 1976г. указанный реактор был модернизирован (ИРТ-М) с доведением тепловой мощности до 5 МВт. В 1988г. реактор ИРТ-М был остановлен и в конце 90-х гг. прошедшего столетия выведен из эксплуатации.

Указанный реактор использовался для проведения многочисленных исследований, в первую очередь по атомной энергетике, в частности, на нем была создана петлевая установка ГПУ-100П с теплоносителем нитрин (N_2O_4+NO), на которой исследовались как ампульные образцы конструкционных материалов и топливных композиций, так и конструкции твэлов и тепловыделяющих сборок, а также изучено влияние температуры, давления, нейтронного и гамма-излучения на изменение физико-химических свойств теплоносителя нитрин и др. (отработан весь комплекс проблем, связанных с созданием передвижной АЭС «Памир-630Д»).

Кроме того на этом реакторе проводились научные исследования в различных областях (физики твердого тела и полупроводников, геологии, медицины, радиационной химии и др.), в частности на нем была создана петлевая установка ХЯУ-5 для изучения радиационно-химических процессов под действием осколков деления (получение гидразина из аммиака).

Взамен выведенного из эксплуатации реактора ИРТ-М в Республике Беларусь планировалось построить два новых исследовательских реактора, но в связи с распадом СССР это не было осуществлено.

Исследовательский реактор ИРТ-2000 Республики Беларусь



Предложение о строительстве нового исследовательского реактора в Республике Беларусь

В 2012-2015 гг. НАН Беларуси неоднократно обращалась в заинтересованные министерства и ведомства Республики Беларусь (министерства энергетики, промышленности, обороны, здравоохранения, образования, по чрезвычайным ситуациям, сельского хозяйства и продовольствия, Госкомвоенпром и др.) с запросом о целесообразности строительства и направлениях использования нового исследовательского реактора в Республике Беларусь.

Указанные министерства и ведомства в части их касающейся проявили заинтересованность в строительстве в Республике Беларусь многофункционального исследовательского ядерного реактора, который должен быть предназначен для решения широкого круга как научных, так и прикладных задач.

Планируемые направления использования исследовательского реактора в Республике Беларусь:

- ядерная физика,
- физика элементарных частиц,
- физика ядерных реакторов,
- физика твердого тела,
- физика конденсированного состояния,
- радиационная физика,
- радиационная химия,
- радиационная биология,
- нейтронный структурный анализ,
- радиационное материаловедение,
- нейтронно-активационный анализ вещества,
- нейтронная радиография и томография материалов и изделий,
- нейтронно-трансмутационное легирование материалов,
- исследование детекторов ионизирующих излучений и контрольно-измерительных приборов,
- радиационная стойкость изделий электронной техники и радиоэлектронной аппаратуры,

Планируемые направления использования исследовательского реактора в Республике Беларусь (продолжение):

- сертификация и сертификационные испытания изделий, предназначенных для использования в условиях воздействия ионизирующих излучений,
- исследование перспективных видов ядерного топлива, поглощающих и конструкционных материалов,
- проведение физических, материаловедческих, теплогидравлических и других исследований с целью верификации математических расчетных кодов,
- испытание и апробация новых типов оборудования различных технологических систем, инновационных приборов и систем управления, контроля и диагностики реактора,
- геохронология (радиоизотопное датирование),
- нейтронозахватная терапия,
- производство изотопов для медицинских, промышленных и сельскохозяйственных целей,
- радиационная стерилизация медицинских изделий и продуктов питания,
- источник позитронов (двухступенчатый нейтрон-гамма-позитронный конвертор),
- источник холодных нейтронов,
- обучение и подготовка кадров в области ядерной энергетики.

Основные технические требования к новому исследовательскому реактору в Республике Беларусь

На основе анализа вышеуказанных планируемых направлений использования исследовательского реактора в Республике Беларусь и перспективных разработок исследовательских ядерных реакторов в мире с учетом рекомендаций МАГАТЭ по обеспечению научного сопровождения развития ядерной энергетики были определены основные технические требования к исследовательскому ядерному реактору, предлагаемому для строительства в Республике Беларусь, важнейшие из которых представлены в таблице.

№	Наименование параметра	Значение
1.	Тип реактора	Бассейновый
2.	Тепловая мощность, МВт	10 – 20
3.	Максимальное значение плотности потока тепловых ($E < 0,625$ эВ) нейтронов, $\times 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$: - в активной зоне - в бериллиевом отражателе	3-4 1-2
4.	Плотность потока нейтронов на выходе из горизонтальных каналов, $\times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$: - тепловых ($E < 0,625$ эВ) - быстрых ($E > 0,82$ МэВ)	0,5 – 2,0 0,005 – 0,05
5.	Обогащение топлива по урану-235, %	Менее 20
6.	Теплоноситель	H_2O
7.	Отражатель	H_2O , Be
8.	Среднее выгорание топлива в выгружаемой ТВС, %	Не менее 50
9.	Количество горизонтальных экспериментальных каналов	Не менее 4
10.	Количество вертикальных экспериментальных каналов	15-25

Бассейновые исследовательские реакторы

На основе проведенного анализа существующих разработок исследовательских реакторов с учетом основных технических требований к исследовательскому реактору применительно к условиям Республики Беларусь наиболее подходящими являются выполняемые в Госкорпорации «Росатом» (АО «НИКИЭТ», АО «НЗХК», АО «ГСПИ» и др.) и НИЦ «Курчатовский институт» разработки бассейновых исследовательских реакторов с водяным теплоносителем тепловой мощностью 10 – 20 МВт с низкообогащенным (19,7 % по урану-235) ядерным топливом.

Разрабатываемые исследовательские реакторы имеют конкурентоспособные потребительские параметры и обеспечивают широкий круг исследований.

Это реакторы бассейнового типа с принудительной циркуляцией теплоносителя через активную зону. В качестве теплоносителя, замедлителя, торцевого отражателя и радиационной защиты используется деминерализованная вода.

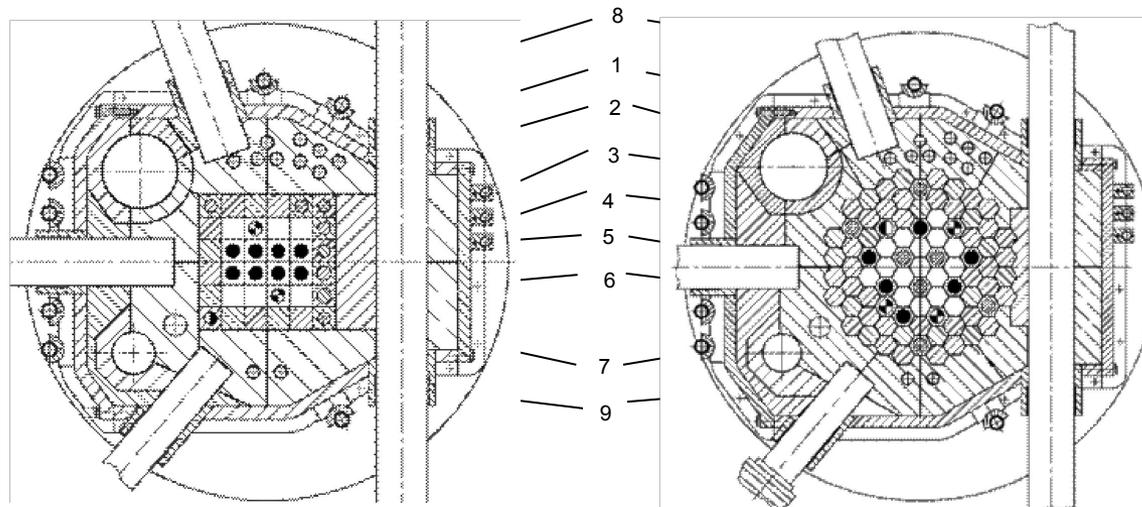
Выбор бассейнового типа реактора вполне оправдан длительной историей безопасной и эффективной работы таких установок. Имея высокие параметры безопасности, бассейновые реакторы позволяют в то же время обеспечивать высокие плотности потоков тепловых нейтронов, достаточные для проведения практически всех исследований, в которых используются тепловые нейтроны.

Основные параметры разрабатываемых реакторов приведены в таблице.

Основные потребительские характеристики бассейновых исследовательских реакторов мощностью 10 МВт и 20 МВт

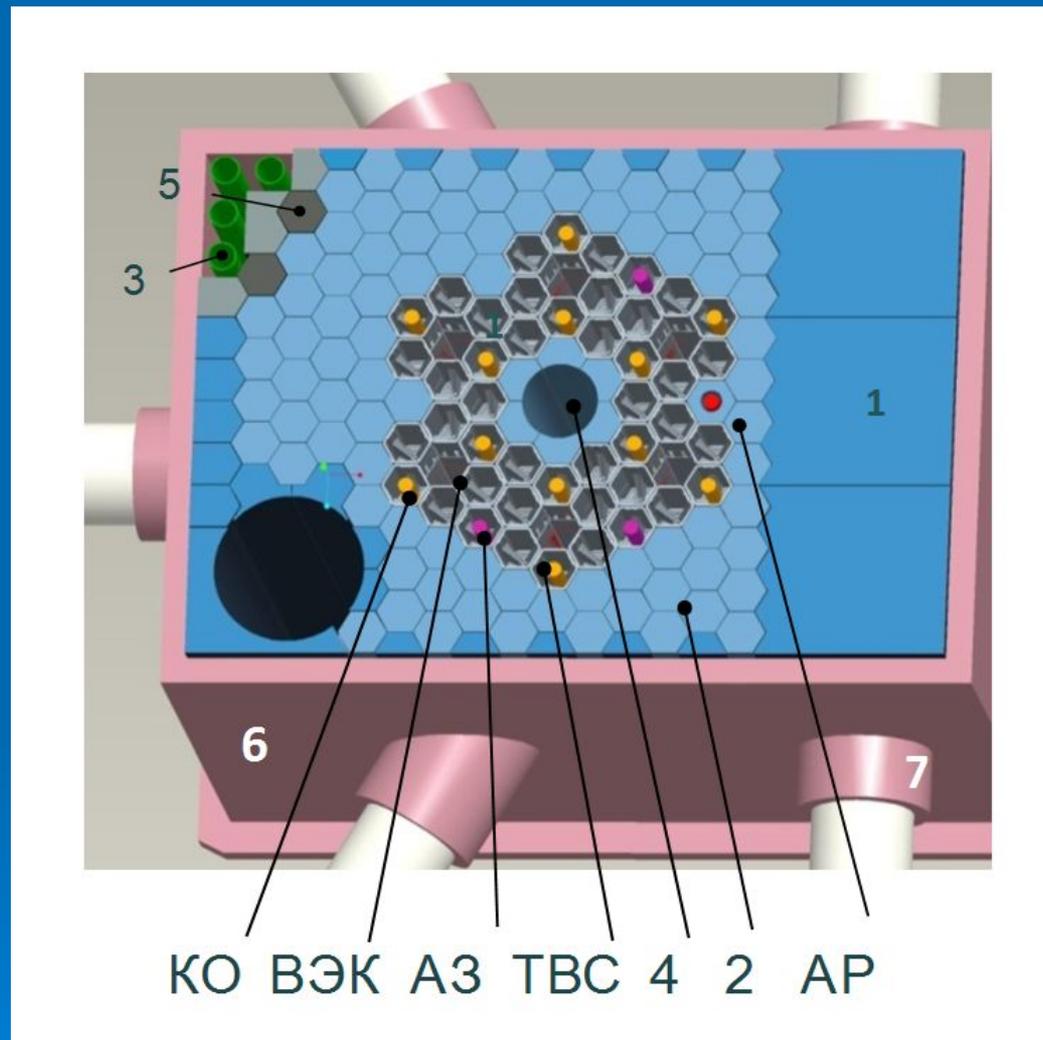
№	Наименование параметра	ИР 10 МВт		ИР 20 МВт	
		ИРТ-4М	ВВР-КН	ИРТ-4М	ВВР-КН
1	Тип ТВС	ИРТ-4М	ВВР-КН	ИРТ-4М	ВВР-КН
2	Тепловая мощность, МВт	10	10	20	20
3	Количество ТВС в активной зоне	16	26	40	45
4	Обогащение топлива по урану-235, %	19,7	19,7	19,7	19,7
5	Высота активной зоны, мм	600	600	600	600
6	Количество регулирующих органов СУЗ	11	10	21	16
7	Поглотитель исполнительных органов СУЗ	B_4C	B_4C	B_4C	B_4C
8	Теплоноситель	Деминерализованная вода			
9	Боковой отражатель	Бериллий			
10	Количество вертикальных экспериментальных каналов	До 25	До 24	До 20	До 17
11	Максимальное значение плотности потока тепловых ($E < 0,625$ эВ) нейтронов, $\times 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$:				
	- в активной зоне	3,2	3,3	4,1	4,6
	- в бериллиевом отражателе	2	2	1,4	1,2
12	Количество горизонтальных экспериментальных каналов	4	4	4	4
13	Плотность потока нейтронов на выходе из горизонтальных каналов, $\times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$:				
	- тепловых ($E < 0,625$ эВ)	0,8-1,3	0,8-1,3	1,2-2	0,6-1,8
	- быстрых ($E > 0,82$ МэВ)	0,004-0,05	0,004-0,05	0,01-0,08	0,003-0,034
14	Допустимое выгорание топлива, %	50			
15	Срок службы реактора, лет	50			

Схемы активных зон исследовательского реактора мощностью 10 МВт с ТВС ИРТ-4М (а) и ВВР-КН (б)



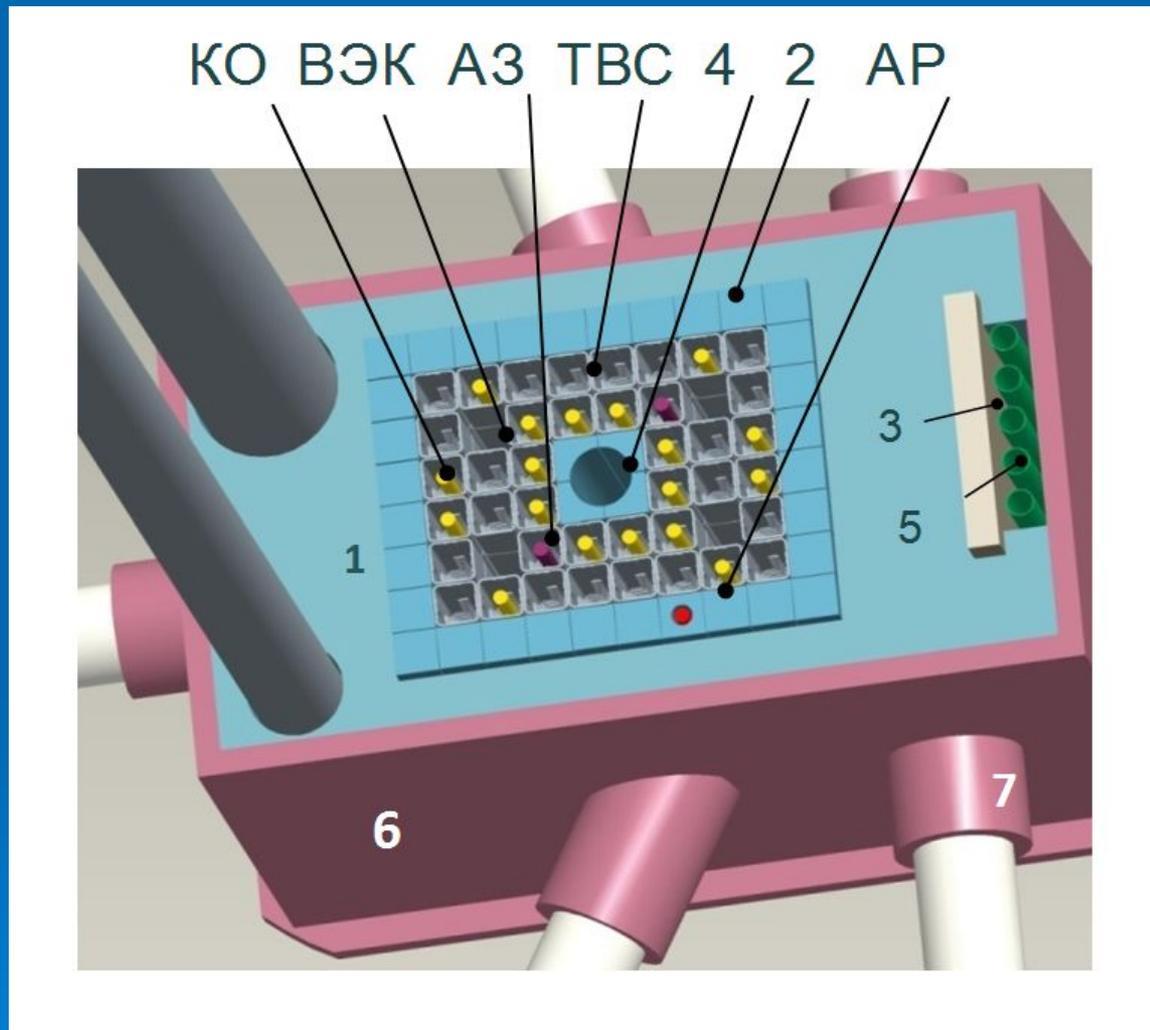
- 1 - стационарный отражатель, 2 - сменный отражатель, 3 - свинцовая защита, 4 - стержень автоматического управления, 5 - компенсирующий стержень, 6 – стержень АЗ, 7 – ТВС, 8 – горизонтальный экспериментальный канал, 9 – вертикальный экспериментальный канал

Схема активной зоны исследовательского реактора тепловой мощностью 20 МВт с ТВС ВВР-КН



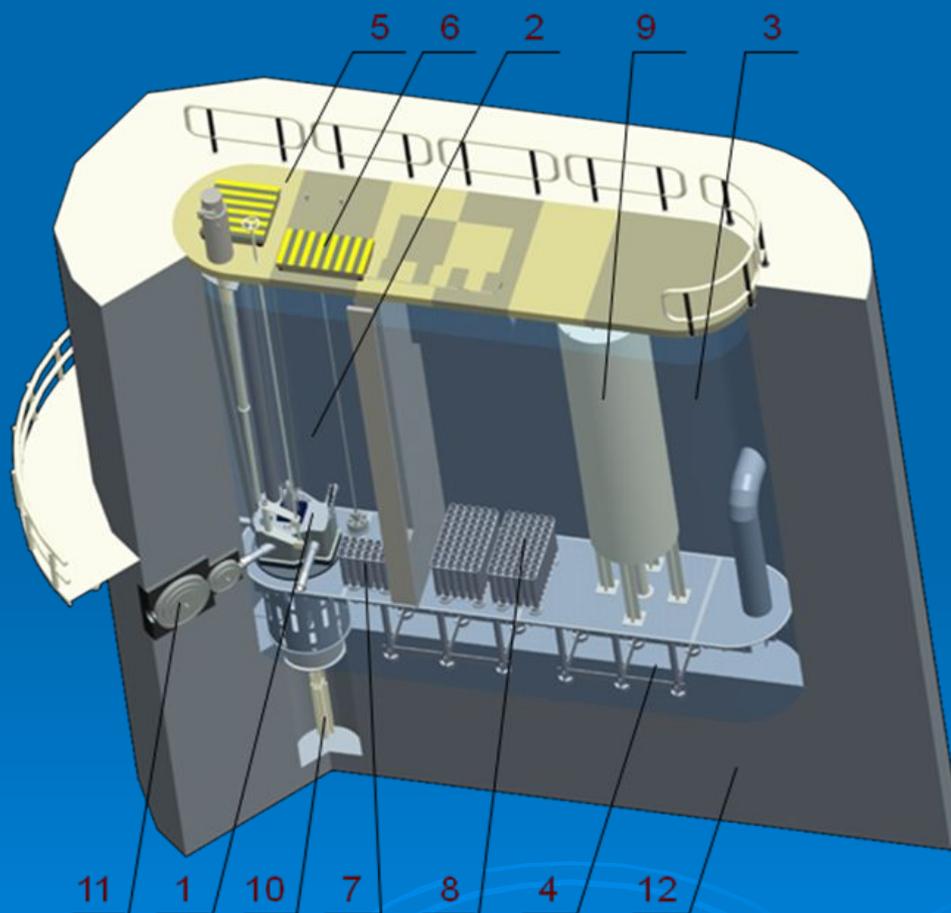
- 1 – стационарный отражатель, 2 – сменный отражатель, 3 – свинцовый экран,
4 – центральная ловушка, 5 – свинцовый экран, 6 – корпус,
7 – горизонтальный экспериментальный канал

Схема активной зоны исследовательского реактора тепловой мощностью 20 МВт с ТВС ИРТ-4М



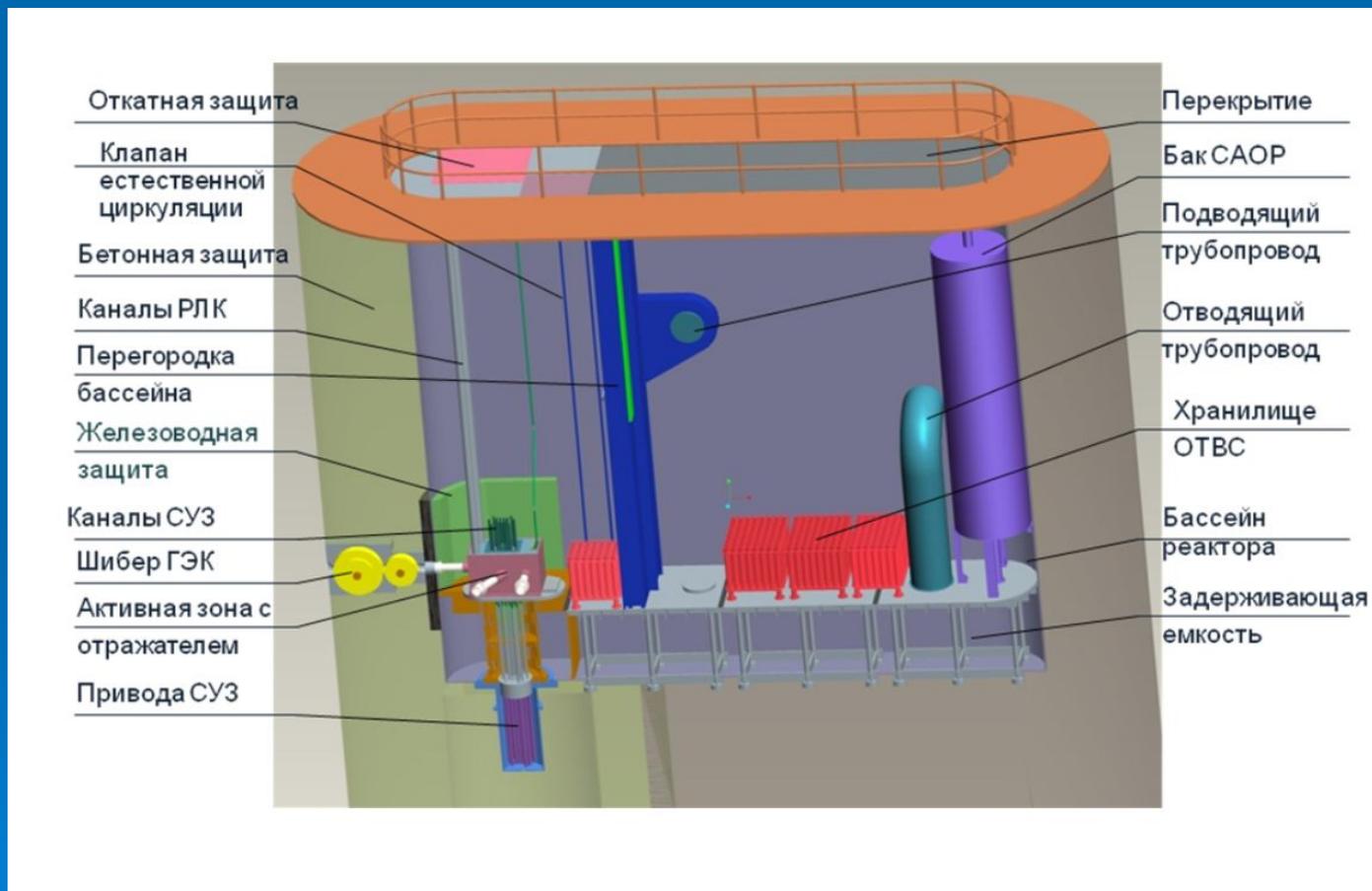
- 1 – стационарный отражатель, 2 – сменный отражатель, 3 – свинцовый экран,
4 – центральная ловушка, 5 – свинцовый экран, 6 – корпус,
7 – горизонтальный экспериментальный канал

Схема бассейнового исследовательского реактора тепловой мощностью 10 МВт



- 1-активная зона и отражатель;
- 2- бассейн реактора;
- 3-бассейн-хранилище;
- 4-задерживающая ёмкость;
- 5-верхнее перекрытие;
- 6-откатная плита;
- 7-промежуточное хранилище;
- 8-хранилище;
- 9-бак САОР;
- 10-привода СУЗ;
- 11-шибер ГЭК;
- 12-массив биологической защиты.

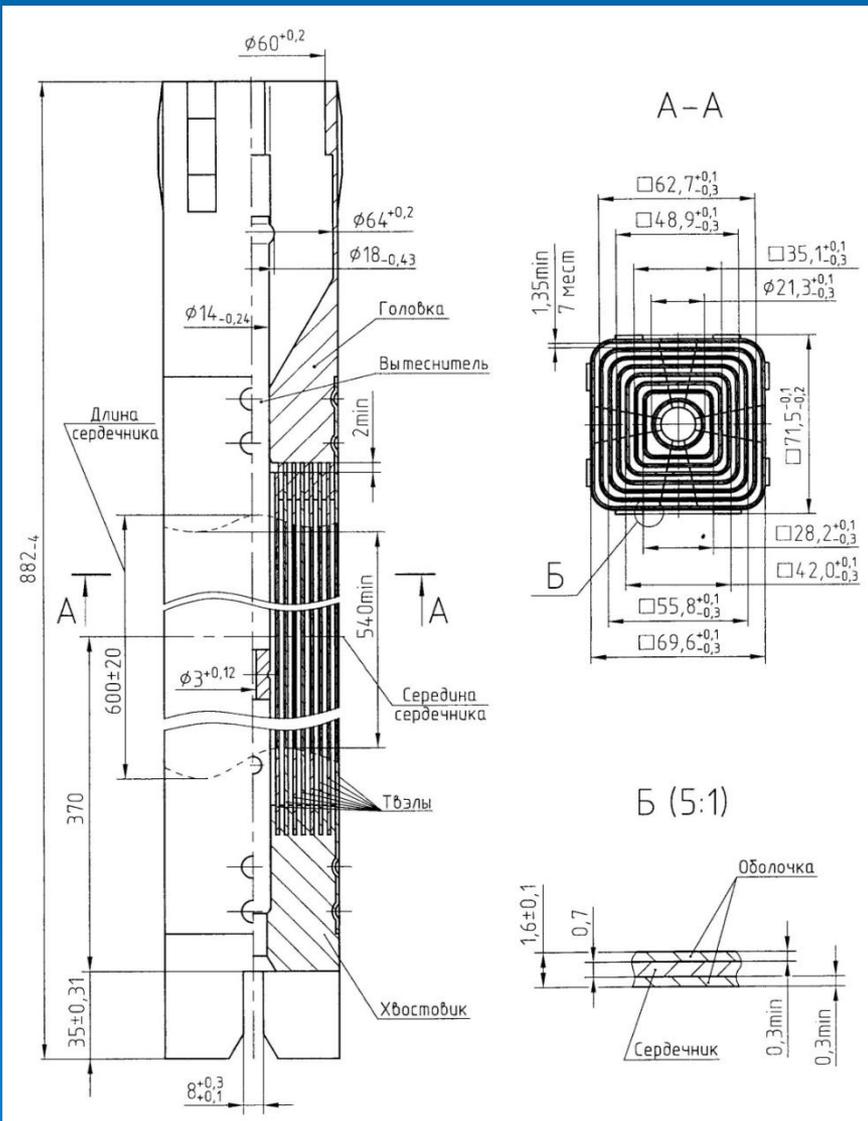
Схема бассейнового исследовательского реактора тепловой мощностью 20 МВт



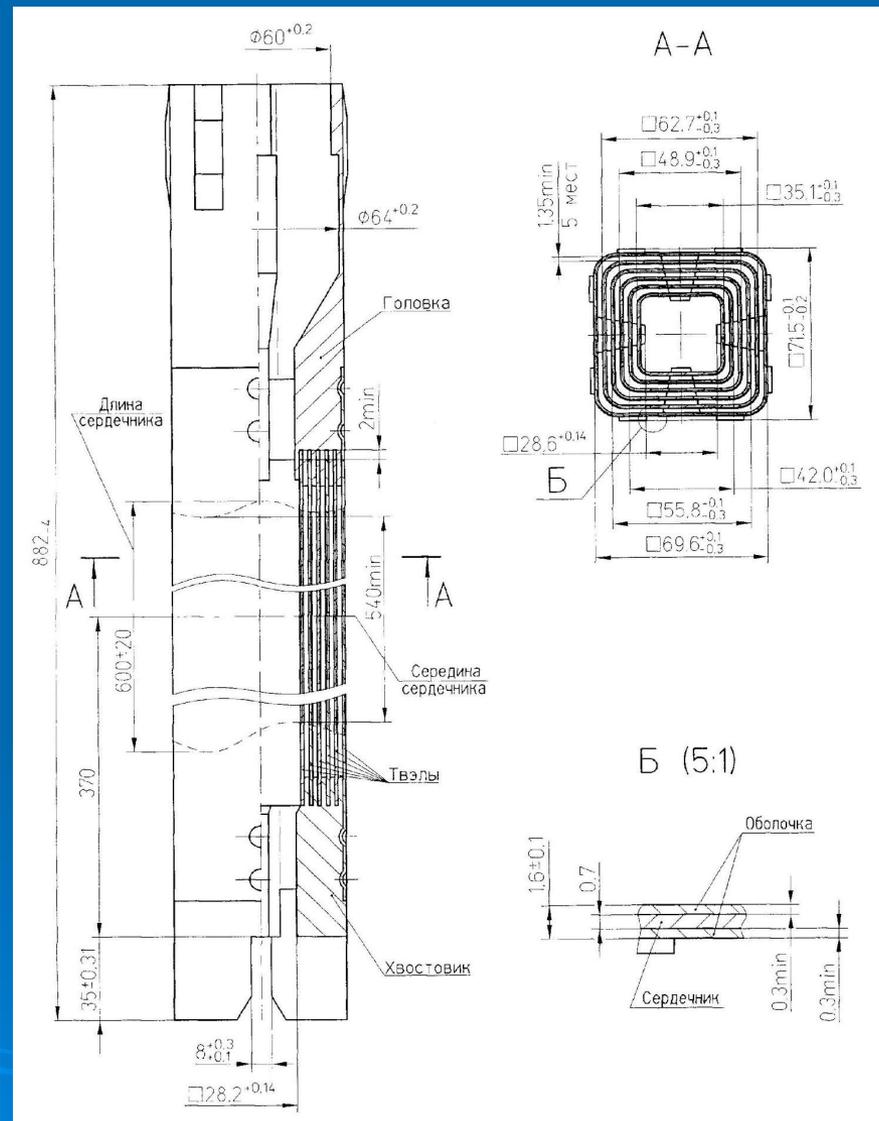
Технические характеристики ТВС с НОУ ядерным топливом, разработанных в России

Характеристика	ИРТ-4М 8/6/4-трубные	ВВР-КН 5/8-трубные
Высота топливного слоя, мм	600	600
Топливная композиция	UO ₂ -Al	UO ₂ -Al
Обогащение по урану-235, %	19,7±0,25	19,7±0,25
Масса урана-235 в ТВС, г	300,0 ± 15,0/263,8 ± 13,1/200,5 ± 10,0	196±7,8/245±9,8
Ширина канала теплоносителя, мм	1,85	2
Плотность U, г/см ³	3,0	3,0
Конструкционный материал оболочек ТВЭЛОВ	SAV-1	SAV-1
Конструкционный материал концевых деталей ТВС	SAV-6 (AMg2)	SAV-6 (AMg2)
Толщина ТВЭЛА, мм	1,6	1,6
Средняя толщина топливной композиции, мм	0,7	0,7
Минимальная толщина оболочки, мм	0,3	0,3

ТВС ИРТ-4М

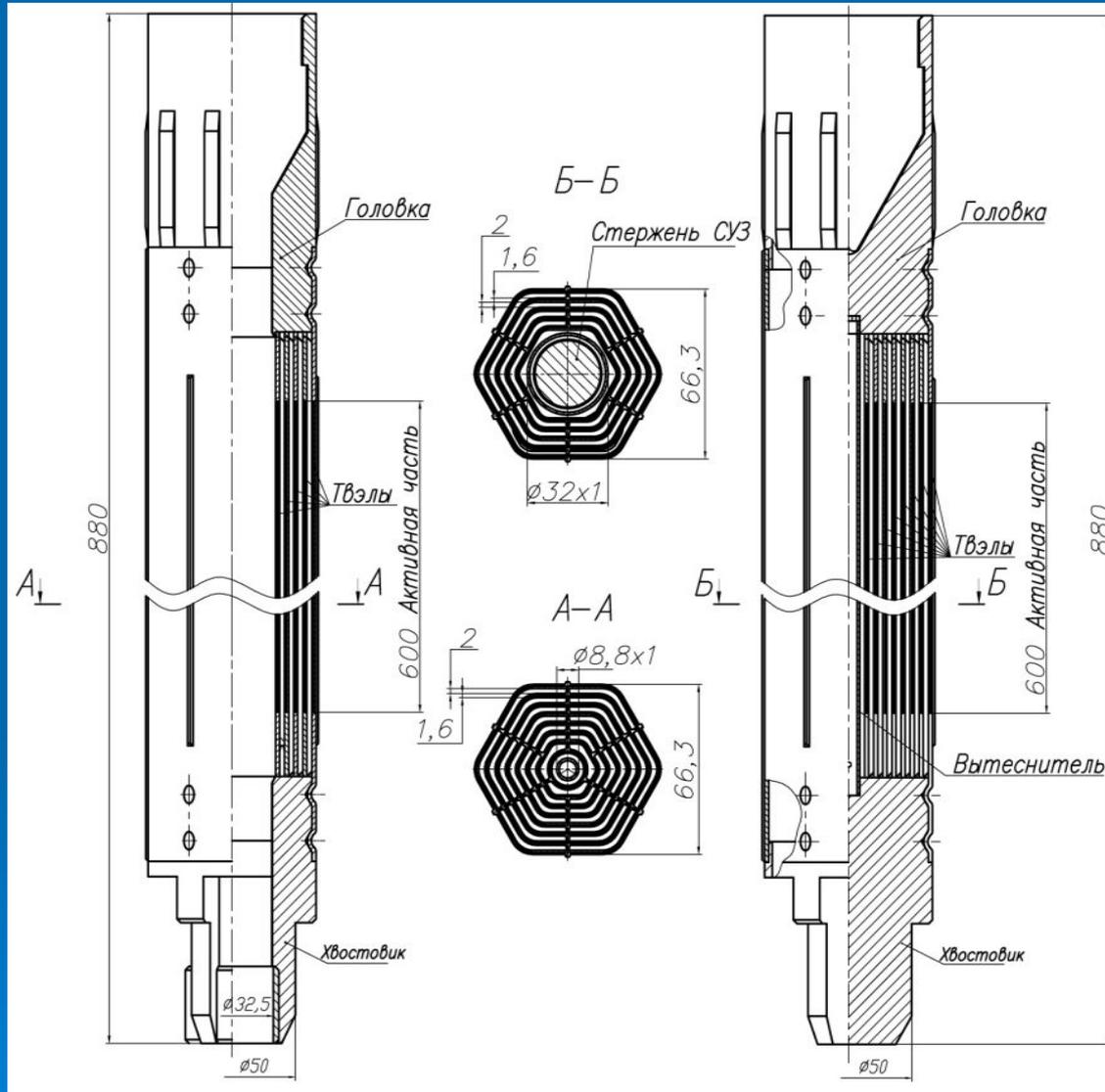


8-трубная ТВС



6-трубная ТВС

ТВС ВВР-КН



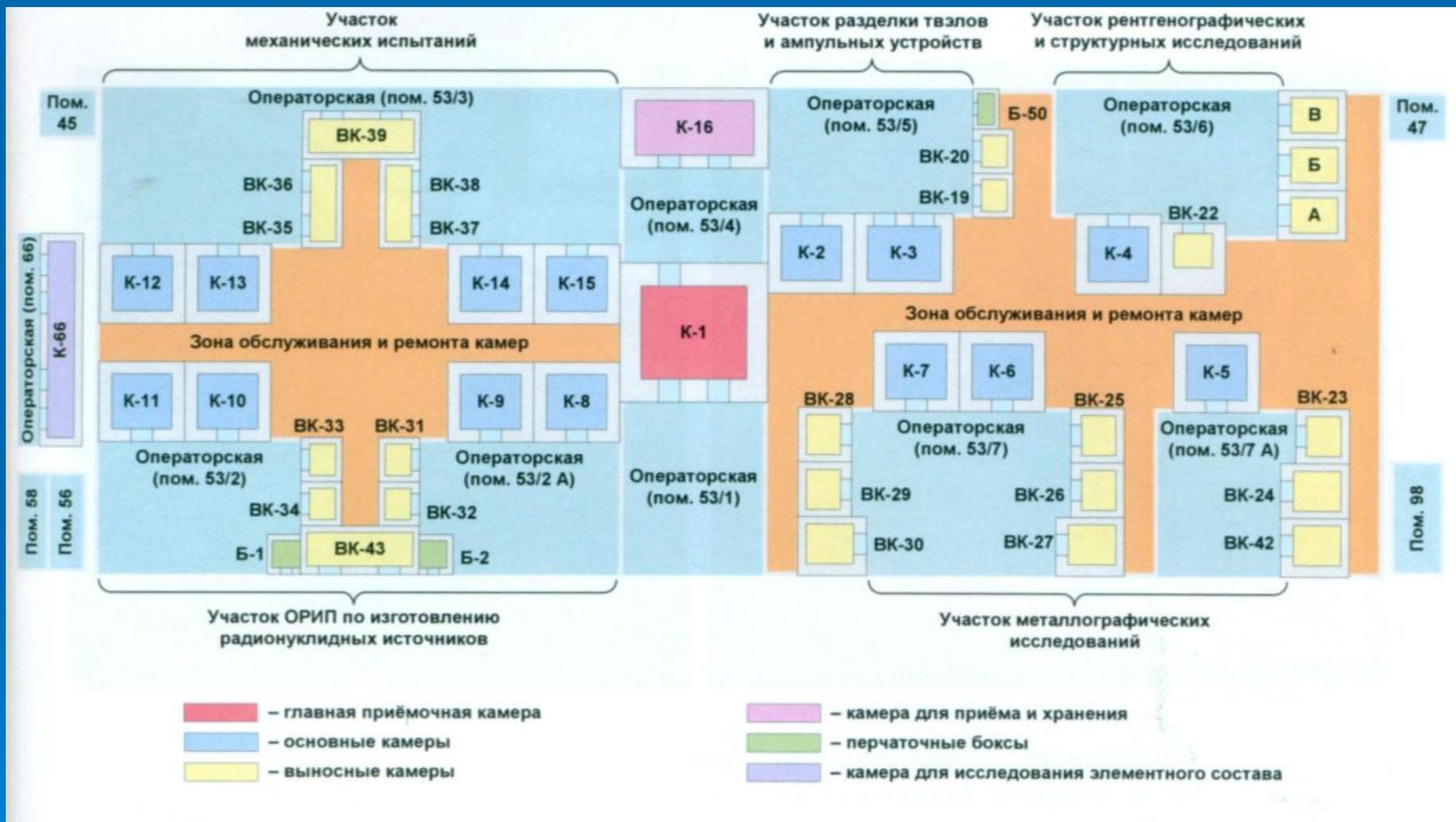
Примеры использования исследовательского реактора Материаловедческий комплекс

Задачами материаловедческого комплекса являются:

- Проведение исследований в области физики радиационных повреждений.
- Решение прикладных задач в области реакторного материаловедения.
- Организация и проведение исследований реакторных материалов и элементов активных зон ядерных реакторов.



Примеры использования исследовательского реактора Материаловедческий комплекс Пример размещения горячих камер

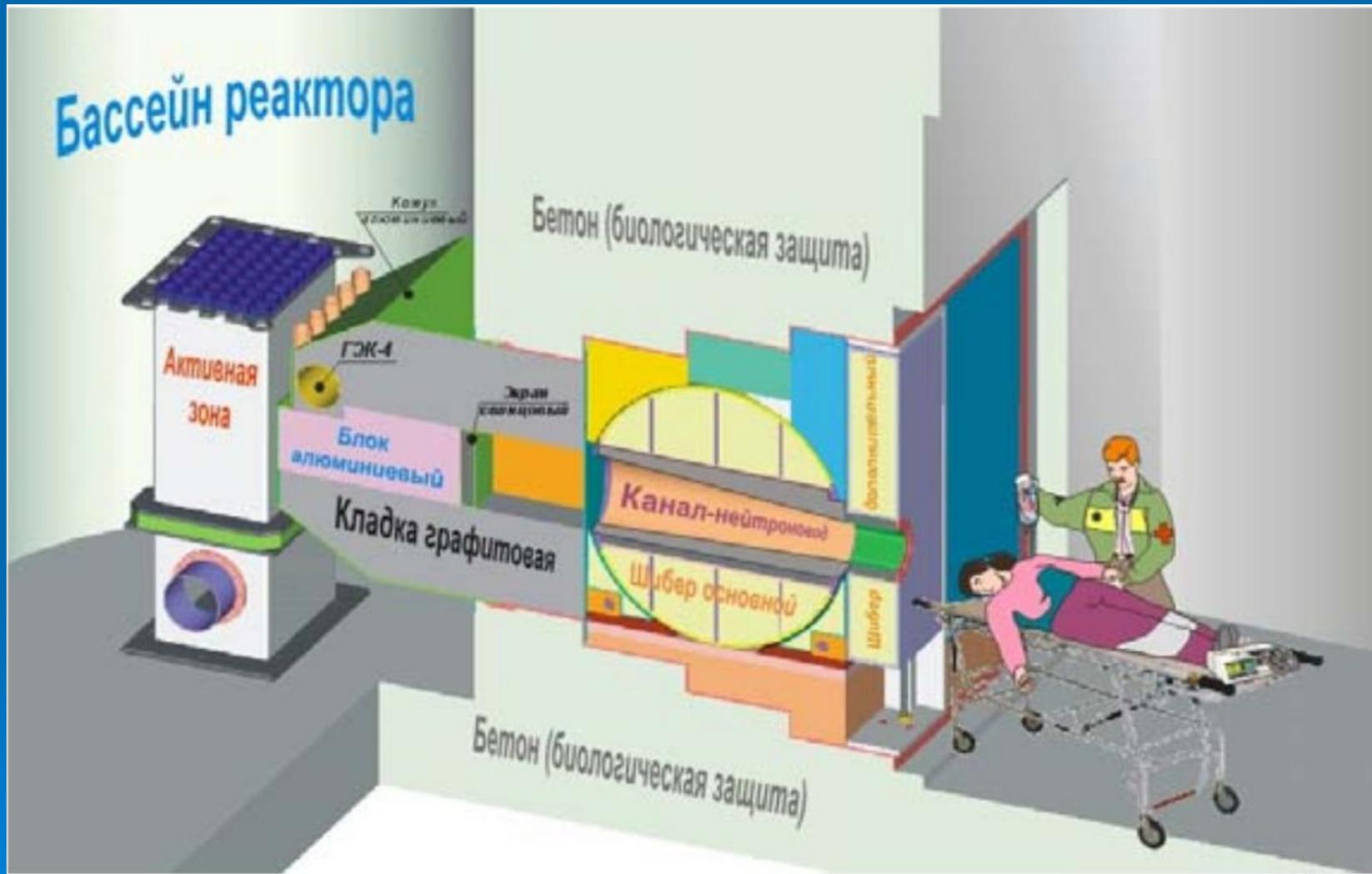


Примеры использования исследовательского реактора Ядерное легирование кремния

- Производство ядерно-легированного кремния обеспечит потребности электрической и электронной индустрии в полупроводниках высокого качества.
- Расчетная производительность монокристаллов кремния диаметром 105 и номиналом удельного электрического сопротивления $65 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ составит не менее 5 т/год.
- Диаметр монокристалла – до 205 мм.
- Длина монокристалла – до 500 мм.
- Диапазон номиналов удельного электрического сопротивления – 3 - 500 $\text{Ом} \cdot \text{см}$.
- Легирующая примесь – фосфор.
- Радиальная неоднородность – 3 - 5 %.
- Отклонение от номинала легирования – 7 - 10 %.



Примеры использования исследовательского реактора Нейтронно-захватная терапия



Примеры использования исследовательского реактора

Нуклиды, перспективные для производства

Радионуклид	Возможный объем производства	Применение	Примечание
Первая очередь			
Молибден-99	До 500 Ки/неделю	Ядерная диагностика онкологических заболеваний (в мире более 90% случаев)	Медицинское применение
Иридий-192	10 кКи/месяц с одного облучательного канала	Источники для дефектоскопов (сварные швы газо- и нефтепроводов)	Промышленное применение
Кобальт-60	До 50 кКи/год с одного канала	Лечение опухолей головного мозга. Источники для обеззараживания, обработки материалов	Медицинское применение / Промышленное применение
Йод-131	До 10 Ки/год с одного канала	Диагностика и терапия заболеваний щитовидной железы	Медицинское применение
Вторая очередь			
Йод-125	До 20 Ки/год с одного петлевого канала	Лечение рака предстательной железы	Медицинское применение
Стронций-89	До 5 Ки/месяц	Лечение костных метастаз	Медицинское применение
Хром-51	До 10 Ки/месяц	Для биологических исследований	Медицинское применение
Фосфор-32	До 5 Ки/месяц		Медицинское применение
Фосфор-33	До 5 Ки/месяц		Медицинское применение

Предварительные нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты активных зон бассейнового исследовательского реактора

В ОИЭЯИ – Сосны НАН Беларуси и Институте энергетики НАН Беларуси были построены соответствующие расчетные модели и с использованием математических кодов проведены предварительные расчеты некоторых нейтронно-физических характеристик и теплогидравлических параметров бассейновых водоохлаждаемых исследовательских реакторов с активной зоной на основе ТВС ИРТ-4М и ВВР-КН.

Расчетные исследования показали возможность компоновки активных зон различной конфигурации, пригодных для решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач в интересах народного хозяйства Республики Беларусь.

Взаимодействие с Госкорпорацией «Росатом»

В мае 2014 г. разработан, согласован и подписан Меморандум о намерениях между Госкорпорацией «Росатом» и НАН Беларуси по сотрудничеству в области создания исследовательского реактора на территории Республики Беларусь.

В сентябре 2014 г. Госкорпорация «Росатом» направила в НАН Беларуси материалы технического предложения по созданию центра ядерной науки и технологий на базе многоцелевого исследовательского ядерного реактора бассейнового типа тепловой мощностью 10-20 МВт.

В апреле 2015 г. НАН Беларуси подготовлены и направлены в Госкорпорацию «Росатом» основные исходные данные для использования на первом этапе работ. В качестве места размещения исследовательского реактора предложено рассмотреть площадку ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны».

В октябре 2015 г. Госкорпорация «Росатом» направила в НАН Беларуси технико-коммерческое предложение на разработку предпроектной документации: декларации о намерениях, обоснования инвестиций, включающего эскизный проект исследовательского реактора, и задание на проектирование реактора и центра ядерной науки и технологий.

Заключение

Согласно действующему в Республике Беларусь законодательству работы по созданию многоцелевого исследовательского реактора и центра ядерной науки и технологий на его основе должны включать как минимум три этапа: 1) разработка, согласование и утверждение предпроектной документации; 2) разработка, согласование и утверждение проекта; 3) строительство реактора и центра.

В соответствии с вышеизложенным предлагается:

1. В 2016 г. – подготовить, согласовать и подписать Соглашение между Правительством Республики Беларусь и Правительством Российской Федерации о проектировании и строительстве в Республике Беларусь многофункционального исследовательского реактора и центра ядерной науки и технологий на его основе.

2. В 2016-2017 гг. – разработать и утвердить предпроектную документацию.

3. В 2017 г. – подготовить, согласовать и утвердить программу Союзного государства по разработке проектной документации реактора и центра.

4. В 2018-2020 гг. – разработать и утвердить проект реактора и центра.

5. В 2021-2025 гг. – осуществить строительство реактора и центра (при наличии нескольких очередей сроки строительства центра могут быть увеличены).