

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РЕАКТОР СМ-3



Основное здание реактора СМ-3

Исследовательский реактор СМ — это корпусной высокопоточный ядерный реактор с промежуточным спектром нейтронов, с охлаждением активной зоны водой под давлением. Физический пуск СМ состоялся 23.05.1961 г., энергетический пуск — 15.10.1961 г.

В конструкции реактора СМ впервые реализована идея получения высокой плотности потока тепловых нейтронов с жестким спектром в замедляющей ловушке в центре активной зоны.

Реактор предназначен для проведения экспериментальных работ по облучению образцов реакторных материалов в заданных условиях, изучению закономерностей изменения свойств различных материалов в процессе облучения, получению трансплутониевых элементов и радиоактивных нуклидов более легких элементов.

За годы эксплуатации реактор неоднократно реконструировался с целью расширения его экспериментальных возможностей и повышения безопасности эксплуатации.

При этом существенные изменения были внесены в конструкцию активной зоны и отражателя, во все основные технологические системы реактора: применены крестообразные твэлы с увеличенной высотой активной части, в качестве отражателя использован металлический бериллий, применены поглотители на основе окиси европия, увеличена мощность реактора.

До реконструкции 1991–1992 гг. реактор имел обозначение СМ-2, после реконструкции — СМ-3. Физический пуск реактора СМ-3 состоялся в декабре 1992 г., энергетический пуск — в апреле 1993 г. В результате реконструкции было обеспечено выполнение современных требований безопасности, расширены экспериментальные возможности.

Работа по расширению экспериментальных возможностей реактора продолжается постоянно.

Ядерное топливо

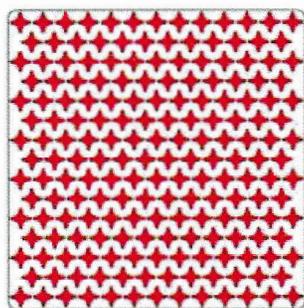
В качестве рабочих ТВС в активной зоне реактора СМ-3 могут быть использованы пять типов ТВС: два типа ТВС (твэлы с загрузкой 5 г ^{235}U), содержащие 0,940 и 0,8 кг ^{235}U , и три типа ТВС (твэлы с загрузкой 6 г ^{235}U), содержащие 1,128, 0,960 и 0,948 кг ^{235}U .

Основные технические характеристики СМ-3

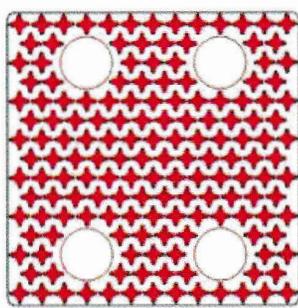
Мощность, МВт	100
Невозмущенная плотность потока тепловых нейтронов в центральной ловушке, макс., см ⁻² ·с ⁻¹	$5 \cdot 10^{15}$
Замедлитель	вода
Теплоноситель	вода
Отражатель	бериллий
Топливо	диоксид урана, обогащение 90%
Конфигурация активной зоны в плане	квадратная с центральной ловушкой
Размер активной зоны, наружный, мм	420×420
Шаг решетки ТВС, мм	70×70
Количество ячеек для ТВС	32 (включая 4 ячейки для КО с топливными подвесками)
Количество ячеек, занятых центральной ловушкой	4
Высота активной зоны, мм	350
Геометрический объем активной зоны/ловушки, л	61,7/6,8
Объем энерговыделяющий, л	48–54,9
Тепловыделяющий элемент	крестообразный, типа СМ
Решетка размещения твэлов в ТВС	треугольная с шагом 5,23 мм
Нагрузка тепловая, средняя по энерговыделяющему объему, МВт/л	1,82–2,08



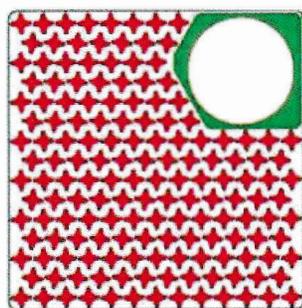
Центральный зал реактора СМ-3



Сечение ТВС 1-го и 3-го типов — 188 твэлов



Сечение ТВС 2-го и 4-го типов — 160 твэлов

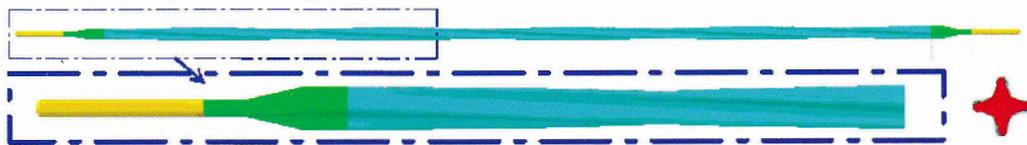


Сечение ТВС 5-го типа — 158 твэлов

Все типы ТВС имеют стандартные габаритные и присоединительные размеры.

ТВС представляет собой неразборную конструкцию, состоящую из нержавеющей стали (для ТВС 1-го и 2-го типа) или циркониевого (для ТВС 3-го, 4-го, 5-го типов) чехла квадратного сечения с наружным размером 69×69 мм, цилиндрического хвостовика и верхней гребенки с головкой для транспортировки. Общая длина ТВС составляет 910 мм. Фиксация твэлов осуществляется по их хвостовикам пластинчатыми дистанционирующими решетками.

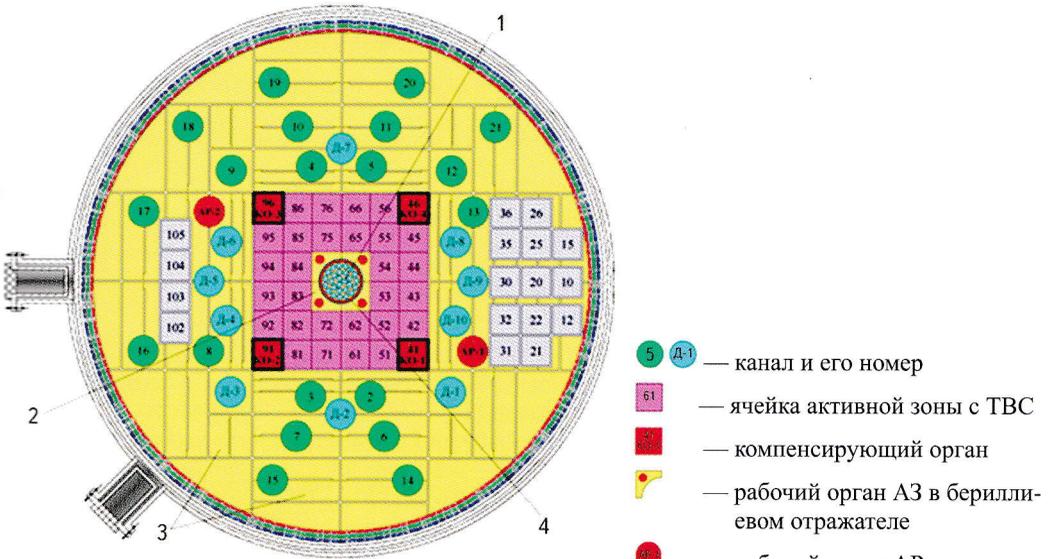
Твэлы имеют в поперечном сечении крестообразную форму. Толщина оболочки твэла — 0,15 мм, топливная композиция — диоксид урана, диспергированный в матрице из смеси меди и бериллиевой бронзы. Высота активной части твэла — 350 мм.



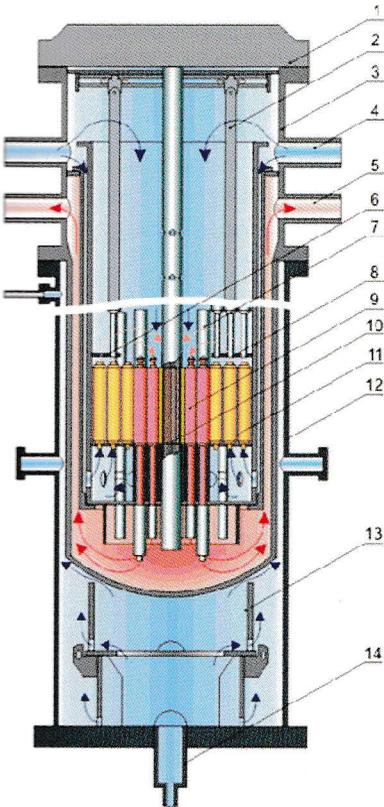
ТВЭЛ реактора СМ-3

Конструктивные характеристики твэла СМ-3

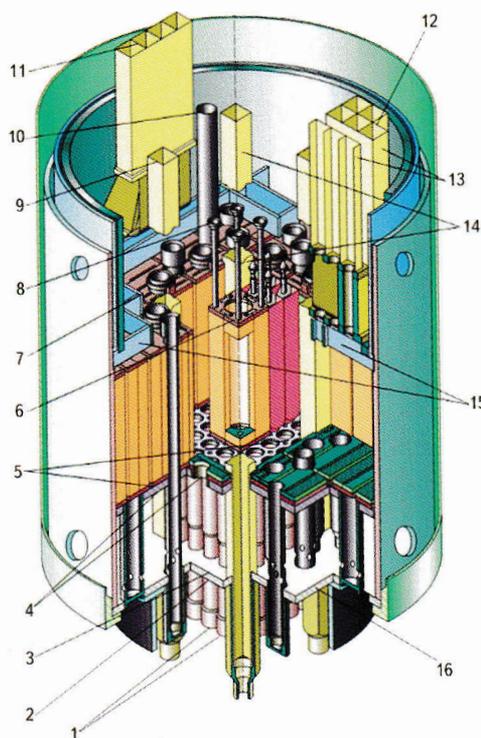
Длина топливного сердечника, мм	346±4
Диаметр твэла, описанный, мм	5,15–0,10
Толщина оболочки, мм	0,15
Шаг завивки ребер, мм	300
Состав топливной композиции, г:	
— UO ₂	5,6
— медь марки ПМС-А	13,7
— бронза марки БрБ2	2,0
Плотность топливной композиции, г/см ³	9,24
Обогащение по ²³⁵ U, %	до 90
Масса ²³⁵ U, г	5,0±0,1 6,0±0,1
Масса твэла, г	32
Коэффициент неравномерности распределения топлива по длине сердечника, не более	1,1



Картограмма активной зоны реактора СМ-3: 1 — ловушка нейтронов; 2 — бериллиевые вкладыши; 3 — бериллиевые блоки отражателя; 4 — центральный компенсирующий орган



Разрез реактора СМ-3: 1 — крышка; 2 — механизм перегрузки; 3 — корпус СМ-3; 4 — входной патрубок; 5 — выходящий патрубок; 6 — малая разгрузочная площадка; 7 — труба КО; 8 — большая разгрузочная площадка; 9 — ТВС; 10 — центральная высокопоточная полость; 11 — бериллиевый отражатель; 12 — корпус СМ-2; 13 — тепловая защита СМ-2; 14 — входной патрубок системы охлаждения межкорпусного пространства



Центральная зона реактора СМ-3: 1 — низ диффузоров; 2 — низ нижней плиты опоры; 3 — верх нижней плиты опоры; 4 — низ верхней плиты опоры; 5 — верх верхней плиты опоры; 6 — верх бериллиевого вкладыша ЦБТМ с АЗ-1; 7 — верх прижимной решетки отражателя около КО-2; 8 — верх направляющей трубы АЗ-2 у бериллиевого вкладыша; 9 — верх направляющей трубы КО-2; 10 — верх направляющей трубы АР-2; 11 — малая загрузочная площадка; 12, 13 — большая загрузочная площадка; 14 — направляющая труба КО-3; 15 — прижимная решетка отражателя; 16 — нижняя плита опоры

Охлаждение активной зоны

Теплосъем в реакторе осуществляется за счет принудительной циркуляции теплоносителя: давление теплоносителя в 1-м контуре — до 4,9 МПа, расход теплоносителя — 2400 м³/ч, скорость потока в активной зоне — 3,7–12,0 м/с, температура на входе/выходе активной зоны — до 50/до 90 °С.

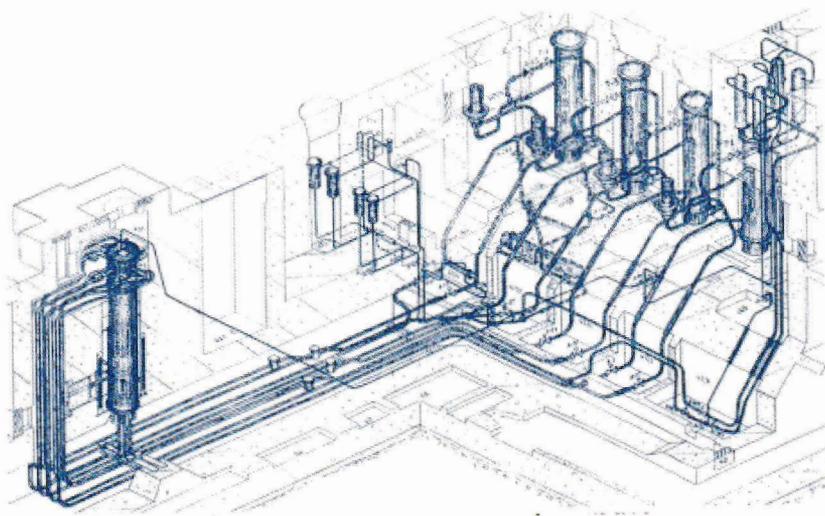


Схема 1-го контура системы охлаждения реактора СМ-3

Экспериментальные возможности

Реактор СМ-3 оснащен широким набором экспериментальных устройств, которые могут размещаться в ловушке нейтронов, в ячейках отражателя и в специализированных ТВС.

Количество мест облучения, в том числе:	до 37		
— ловушка	1 (блочный вариант — 27 ячеек для мишеней; каналный вариант — 18 ячеек для мишеней)		
— активная зона	до 6 (ТВС 2-го или 4-го типа, каждая с четырьмя ячейками для мишеней) до 4 (ТВС 5-го типа, каждая с одной ячейкой для мишени)		
— отражатель	30 (из них 20 мест для установки каналов с выводом каналов информации или теплоносителей через крышку реактора)		
Плотности потоков нейтронов в облучательных устройствах, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$:	Энергия нейтронов		
	$\leq 0,67$ эВ	0,67–100 эВ	$\geq 0,1$ МэВ
— ловушка	$1,3 \cdot 10^{15}$	$1,7 \cdot 10^{14}$	$1,4 \cdot 10^{15}$
— ТВС	$1,3 \cdot 10^{14}$	$9,3 \cdot 10^{13}$	$2,0 \cdot 10^{15}$
— ячейки отражателя	$1,35 \cdot 10^{15} - 9 \cdot 10^{13}$	—	$3,3 \cdot 10^{14} - 2,5 \cdot 10^{12}$

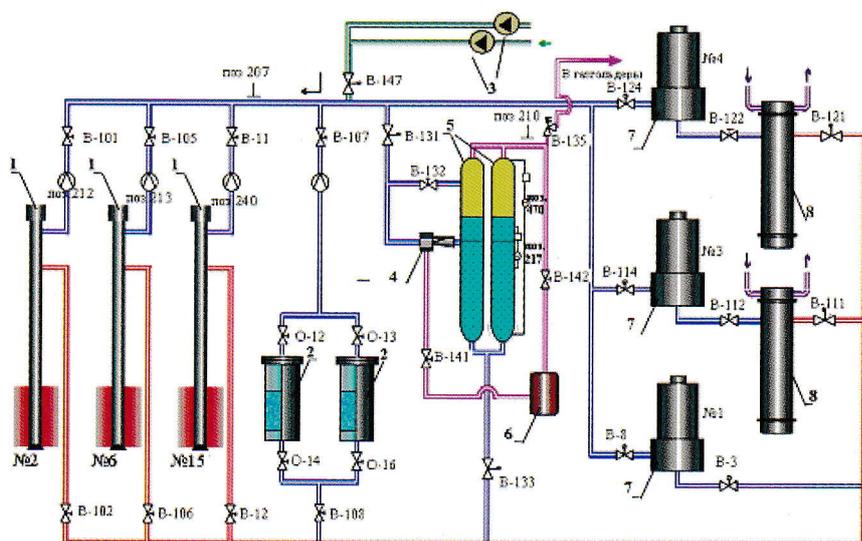
В составе реактора СМ-3 эксплуатируются низкотемпературная петлевая установка ВП-1 (ПУ ВП-1) (введена в эксплуатацию в 1963 г., модернизирована в 2003 г.) и высокотемпературная петлевая установка ВП-3 (ПУ ВП-3) (введена в эксплуатацию в 1977 г., модернизирована в 1994 г.).

ПУ ВП-1 предназначена для испытаний опытных тепловыделяющих элементов, облучения образцов конструкционных и поглощающих материалов, а также для получения изотопной продукции.

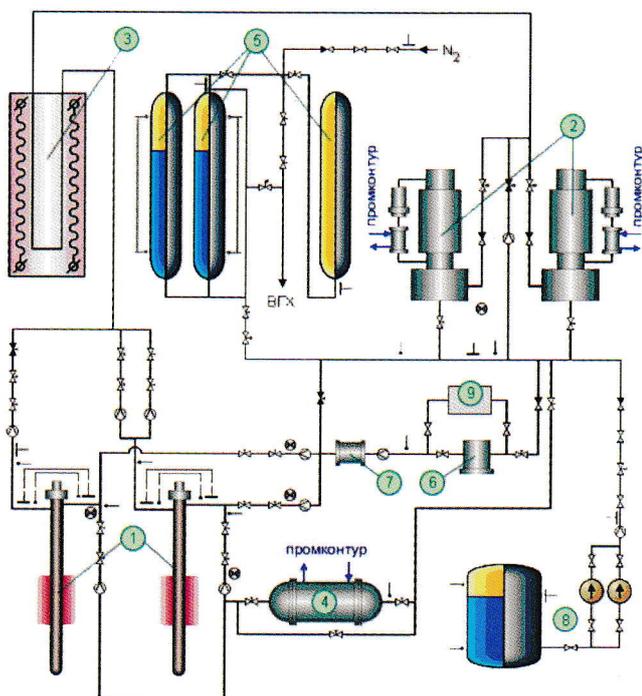
ПУ ВП-3 предназначена для проведения исследований работоспособности тепловыделяющих элементов реакторов различных типов, изучения выхода продуктов деления из негерметичных твэлов и способов удаления их из первого контура, материаловедческих исследований конструкционных, поглощающих материалов.

Технические характеристики ПУ ВП-1, ВП-3

	ПУ ВП-1	ПУ ВП-3
Теплоноситель	дистиллят	дистиллят
Максимальное рабочее давление, МПа	4,9	18,5
Температура теплоносителя, °С	90	300
Расход, $\text{м}^3/\text{ч}$	30	5–8
Мощность одного канала, кВт	500	50
Количество облучательных каналов	3	3



Принципиальная схема петлевой установки ВП-1: 1 — петлевой канал; 2 — ионообменный фильтр; 3 — насосы подпитки; 4 — эжектор; 5 — дегазатор; 6 — контактный аппарат; 7 — циркуляционный насос; 8 — теплообменник



Принципиальная схема петлевой установки ВП-3: 1 — петлевые каналы; 2 — циркуляционные насосы; 3 — электропечь; 4 — теплообменник; 5 — система компенсации объема; 6 — низкотемпературный фильтр; 7 — холодильник; 8 — система подпитки; 9 — система контроля химического состава теплоносителя

Основные направления исследований

Материаловедческие исследования

Основным направлением материаловедческих исследований является изучение механизмов радиационных повреждений существующих и перспективных делящихся, конструкционных и поглощающих материалов.

Изотопная программа

Уникальные возможности высокопоточного исследовательского реактора СМ-3 позволили ему занять ведущее место в Европе в области производства трансурановых элементов и накопления радионуклидов с высокой удельной активностью.

Это обусловлено преимуществами реактора:

- значительное количество каналов в отражателе с диапазоном плотности потока тепловых нейтронов от 10^{14} до $1,5 \cdot 10^{15}$ $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;
- возможность облучения мишеней в массиве тепловыделяющих элементов активной зоны, где существенна доля надтепловых и быстрых нейтронов;
- наличие в центре активной зоны нейтронной ловушки с невозмущенной плотностью потока тепловых нейтронов до $5 \cdot 10^{15}$ $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

В ячейках нейтронной ловушки и двух ближайших к активной зоне ячейках отражателя организован многостадийный процесс наработки тяжелых изотопов кюрия и калифорния. Кроме того, производится накопление целого ряда радионуклидов с высокой удельной активностью: никель-63; олово-113, -119m; вольфрам-188; железо-55, -59; хром-51 и других. Также проводится активация заготовок источников на основе селена-75 и иридия-192.

Экспериментальные каналы в активной зоне используются для облучения стартовых материалов с целью получения в жестком спектре нейтронов фосфора-32, -33, гадолиния-153, олова-117m и др.

В ближайших к активной зоне ячейках отражателя проводится широкомасштабное накопление таких радионуклидов, как кобальт-60 и иридий-192. Годовой объем производства достигает 200–300 кКи кобальта-60 и 400 кКи иридия-192.

В одной из ячеек отражателя в специальном инструментованном устройстве, обеспечивающем постоянный контроль нейтронного потока во время облучения, проводится прецизионная активация заготовок источников на основе кобальта-60 медицинского назначения. В год производится около 1000 источников.

Международное сотрудничество

На исследовательском реакторе СМ-3 проводятся исследования в сотрудничестве с МАГАТЭ, Китаем, США, странами ЕС, СНГ и другими странами.

Основная деятельность

На реакторе СМ-3 выполнена значительная исследовательская программа по радиационному материаловедению.

В ближайшее время планируется:

- размещение в топливной части активной зоны двух петлевых каналов диаметром до 68 мм;
- размещение в специально разработанных ТВС ампульных каналов \varnothing 24,5 мм при сохранении имеющихся 24 малых ампульных каналов \varnothing 12 мм;
- разработка твэлов с малым вредным поглощением.

История

Необходимость развития ядерной науки и техники требовала проведения различных исследований, в том числе ускоренного изучения изменения свойств материалов под воздействием излучения. Поэтому И. В. Курчатовым была поставлена задача о разработке реактора со сверхвысокой плотностью потока нейтронов (свыше 10^{15} см⁻²·с⁻¹).

Под руководством С. М. Фейнберга был выполнен большой комплекс расчетных и экспериментальных работ, который определил основной облик нового реактора:

- активная зона — гетерогенная с ловушкой нейтронов в центре;
- спектр нейтронов в активной зоне — промежуточный;
- твэлы — пластинчатого типа с высотой активной части 250 мм;
- мощность реактора — 50 МВт;
- плотность потока тепловых нейтронов в ловушке — $2 \cdot 10^{15}$ см⁻²·с⁻¹;
- отражатель — оксид бериллия.

По инициативе И. В. Курчатова в 1956 г. была создана координационная группа в составе С. М. Фейнберга, В. А. Цыканова, Ю. М. Булкина, С. Т. Конобеевского, Н. Ф. Правдюка и Г. Н. Яковлева. Работа этой группы обеспечила выполнение поставленной задачи: подготовить к началу строительства, намеченного на 1958 г., всю необходимую проектную и конструкторскую документацию. Разработка конструкции реактора проводилась в НИКИЭТ под руководством Н. А. Доллежала. Главным отделом руководил Ю. М. Булкин. Конструкция твэлов была разработана ВНИИНМ в отделе, которым руководил А. Г. Самойлов. Проект реактора и комплекса в целом, включая материаловедческую и радиохимическую лаборатории, был выполнен во ВНИПИЭТ. Работы выполнялись в отделении, руководимом И. Д. Дмитриевым. Первый ковш земли под фундамент здания реактора был вынут в июле 1958 г. И уже в сентябре 1961 г. реактор был выведен на мощность. Проектное значение 50 МВт было достигнуто в октябре 1961 г.

За годы эксплуатации реактор неоднократно реконструировался с целью расширения его экспериментальных возможностей и повышения безопасности эксплуатации.

При этом существенные изменения были внесены в конструкцию активной зоны и отражателя, во все основные технологические системы реактора и экспериментальных устройств.

Малая реконструкция 1964 г.

Основные работы:

- пластинчатые твэлы топливных сборок заменены на крестообразные с увеличением высоты активной части твэлов с 250 до 350 мм;
- в компенсирующих стержнях СУЗ бериллиевые вытеснители заменены топливными догрузками, а в вертикальный центральный канал установлен дополнительный компенсирующий стержень.

Результаты:

- обеспечено более глубокое выгорание топлива и увеличена продолжительность работы между перегрузками до 15 суток;
- стало возможным занять часть ячеек активной зоны под облучение стартовых материалов с целью накопления трансурановых элементов.

Реконструкция 1965 г. с заменой центральной зоны

Основные работы:

- в качестве отражателя применен металлический бериллий;
- введена в строй система КГО с индивидуальным отбором проб от ТВС активной зоны;
- заменены насосы первого контура на более совершенные и надежные;

- две водяные петли объединены в одну низкотемпературную петлю с полным ее отделением от первого контура реактора;
- установлен насос, обеспечивший надежное расхолаживание активной зоны при проведении перегрузочных работ внутри реактора со сбросом давления.

Результаты:

- обеспечена безопасная и надежная работа реактора на мощности 75 МВт, плотность потока нейтронов возросла до $3,3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Реконструкция 1974 г.

Основные работы:

- произведена замена теплообменников на новые (из нержавеющей стали);
- модернизирована система аварийного охлаждения реактора.

Результаты:

- мощность реактора увеличена до 100 МВт, плотность потока нейтронов достигла $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Реконструкция 1977–1978 гг.

Основные работы:

- установлена новая центральная зона;
- внедрено гидропрофилирование ячеек активной зоны дроссельными вставками;
- модернизирована электросиловая часть главных циркуляционных насосов.

Результаты:

- увеличен расход теплоносителя с 2000 до 2400 м³/ч;
- повышен запас до кризиса теплосъема до значения 1,7.

Большая реконструкция 1991–1992 гг.

Основные работы:

- изготовлен и установлен новый корпус реактора, старый корпус выполняет функцию страховочного кожуха, выдерживающего давление первого контура;
- изменены трассы трубопроводов первого контура с обеспечением подвода и отвода теплоносителя в верхней части корпуса;
- изменена компоновка активной зоны;
- модернизирована система аварийного охлаждения реактора с применением активных и пассивных средств;
- создан измерительно-вычислительный комплекс всех технологических параметров на базе ЭВМ;
- создан дополнительный источник энергоснабжения в виде дизельной электростанции.

Результаты:

- в результате реконструкции была повышена безопасность установки, обеспечено выполнение современных требований безопасности, расширены экспериментальные возможности;
- в ходе эксплуатации реактора накоплен огромный опыт по совершенствованию различных систем и оборудования, повышению безопасности эксплуатации.

Работа по расширению экспериментальных возможностей реактора продолжается. Разработана и реализуется концепция модернизации активной зоны реактора, основной целью которой является обеспечение возможности проведения длительных облучений образ-

цов материалов ЯЭУ, в том числе в инструментированных устройствах большого диаметра, в жестком нейтронном спектре при скорости повреждения до 15 сна в год, скорости наработки гелия до 1000 аррм в год при температуре до 330 °С и в заданном водно-химическом режиме.

Все эти годы научное руководство эксплуатацией реактора, включая расширение его экспериментальных возможностей, беспрерывно осуществлял В. А. Цыканов, техническое — главные инженеры реактора (в разные годы): П. Г. Аверьянов, А. С. Кусовников, А. И. Кузнецов, Ю. В. Елисеев, А. Г. Цыкунов, В. А. Гремячкин, А. Л. Петелин, А. И. Звир, в настоящее время — С. А. Сазонтов.

Постоянно проводимая планомерная и целенаправленная работа по усовершенствованию и продлению срока эксплуатации реакторной установки позволит использовать реактор СМ-3 в исследовательских целях еще как минимум 25 лет.

Персоны



Фейнберг Савелий Моисеевич



Цыканов Владимир Андреевич



Петелин Алексей Леонидович

Начальник отделения реакторного исследовательского комплекса

Контакты



Сазонтов Сергей Аркадьевич

Главный инженер реакторов СМ-3, РБТ-6

Тел.: +7(842)356-56-55. Факс: +7(842)356-55-92.

E-mail: PAL@niiar.ru