

УДК 621.039.573

## Исследовательский реактор РБТ-6

ПЫКАНОВ В. А., АВЕРЬЯНОВ П. Г., БУРУКИН В. П., ЗАЛЕТНЫХ Б. А.,  
КОРМУШКИН Ю. П., КОРОТКОВ Р. И., КУСОВНИКОВ А. С., СПИРИДОНОВ Ю. Г.

Высокопоточный исследовательский реактор СМ-2 [1], оснащенный большим числом экспериментальных каналов, удобен для облучения материалов в интенсивных потоках нейтронов.

Однако в исследованиях по радиационному материаловедению встречаются задачи, выполнение которых на таком реакторе либо нецелесообразно, либо практически невозможно. В некоторых случаях (например, исследование свойств электротехнических материалов, определение физических свойств конструкционных и делящихся материалов в процессе их облучения и т. п.) не требуется облучения до высоких значений флюенса. Выполнение таких исследований на высокопоточном реакторе требует кратковременных облучений, что снижает эффективность его использования. Для решения других задач (определение длительной прочности и ползучести конструкционных материалов в процессе облучения и др.) необходимо длительное облучение материалов при сравнительно невысокой интенсивности излучений, но при постоянных параметрах, характеризующих условия облучения. Продолжительность непрерывной работы высокопоточного реактора между двумя перегрузками топлива не может обеспечить условий для проведения таких исследований, поскольку они требуют непрерывной работы реактора от нескольких сот до нескольких тысяч часов. Кроме того, экспериментальные каналы высокопоточного реактора являются сложными и дорогостоящими конструкциями, использование которых оправдано только для экспериментов, требующих высокой интенсивности потоков излучения.

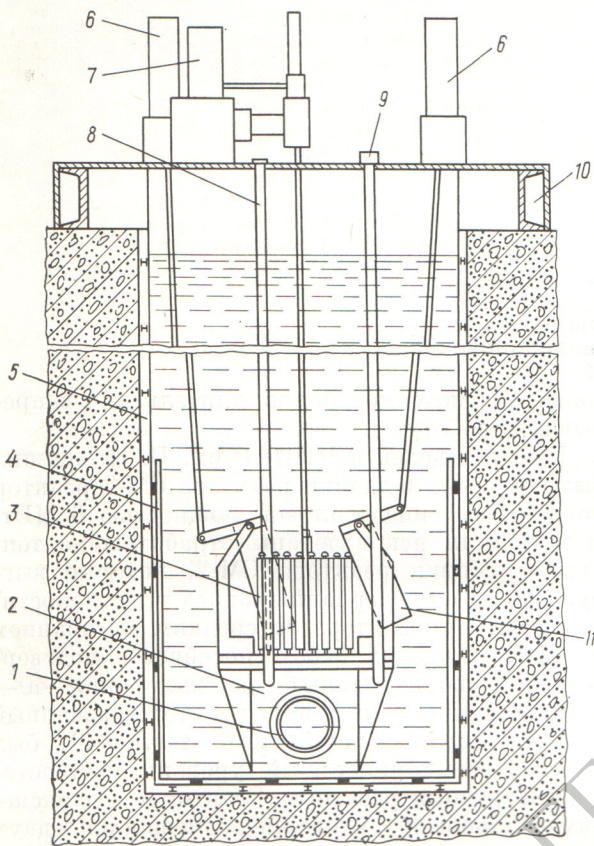
Для перечисленных работ целесообразно использовать конструктивно более простой и доступный для проведения эксперимента реактор, обеспечивающий при сравнительно невы-

соких потоках нейтронов длительную непрерывную работу.

Для этих целей в НИИАР им. В. И. Ленина был сооружен в здании реактора СМ-2 реактор погружного типа тепловой мощностью 6 МВт. В нем были использованы отработавшие топливные сборки реактора СМ-2, которые выгружаются (по исчерпанию запаса реактивности) из основного реактора со средним выгоранием 30—35%, хотя их работоспособность подтверждена экспериментально до выгорания 40—45%. В конце 1975 г. этот реактор, названный РБТ-6 (реактор бассейновый, тепловой), был выведен на номинальный уровень мощности.

**Конструкция реактора.** Реактор и его экспериментальное оборудование размещаются в двух баках, установленных в смежных защитных бетонных каньонах в здании реактора СМ-2. Каждый из баков представляет собой жесткую конструкцию в виде емкости с двойными стенками. В первом баке (с размерами в плане 2430 × 1540 мм) размещаются активная зона с экспериментальными каналами, чехлы детекторов СУЗ и промежуточные хранилища топливных сборок. На стенках этого бака вблизи активной зоны смонтирована многослойная тепловая защита бетона, выполненная из нержавеющей стали. Во втором баке (2530 × 1260 мм) размещается установка нейтронной радиографии. На уровне активной зоны оба бака соединены трубопроводом диаметром 1000 мм для вывода нейтронного пучка к этой установке.

Активная зона реактора размещена на коробчатой опорной конструкции (рис. 1), в отверстия верхней плиты которой устанавливаются хвостовики топливных сборок, а в одну из боковых стенок вварен всасывающий трубопровод, идущий к циркуляционному насосу. Максимальное число ячеек для установки топливных сборок 64 (8 × 8). Шаг ячеек активной зоны составляет 78 мм, что обеспечивает зазо-



Р и с. 1. Вертикальный разрез реактора РБТ-6:

1 — всасывающий трубопровод; 2 — опорная конструкция; 3 — активная зона; 4 — тепловой экран; 5 — бак; 6 — приводы АЗ-КО; 7 — привод АР; 8 — экспериментальный канал; 9 — чехол ионизационной камеры; 10 — короб вытяжной вентиляции, 11 — поглощающая пластина

ры между сборками 9 мм, предназначенные для размещения в них органов СУЗ. Кроме того, установка сборок с зазорами обеспечивает снижение критической загрузки реактора.

Исполнительные органы СУЗ включают в себя один стержень автоматического регулирования (АР) и 12 поглощающих пластин, выполняющих функции аварийной защиты и компенсирующих органов (АЗ-КО) (рис. 2). Все исполнительные органы СУЗ выполнены из листового кадмия, облицованного нержавеющей сталью.

Стержень АР имеет Т-образный профиль и перемещается вертикально. Пластины АЗ-КО вводятся в активную зону с двух ее боковых граней на глубину трех рядов топливныхборок. На нижней части хода ( $\sim 1/4$ ) пластины выполняют функции аварийной защиты. Каж-

дый исполнительный орган АЗ-КО включает по две соседние пластины, управляемые независимым приводом. Приводы всех исполнительных органов СУЗ установлены на площадке обслуживания реактора. Передача от приводов к пластинам АЗ-КО осуществляется через систему рычагов.

Размещение приводов на площадке обслуживания и принятая компоновка АЗ-КО обеспечивает свободный доступ к любой ячейке активной зоны и к экспериментальным каналам.

Топливные сборки перегружаются вручную специальным инструментом. Защита от излучений реактора обеспечивается бетонными стенками каньона и слоем воды над активной зоной (6,8 м).

Технологическая схема реактора (рис. 3) проста и надежна в эксплуатации. Все ее оборудование размещается в трех небольших помещениях.

**Экспериментальные возможности реактора и его физико-технические характеристики.** Основные экспериментальные каналы реактора размещены в активной зоне в нейтронных ловушках, образующихся при извлечении части топливныхборок. Размер водяной ловушки, образованной извлечением одной сборки, близок к оптимальному [2], что обеспечивает формирование в ней достаточно высокого потока тепловых нейтронов.

Изменение состава среды в канале (газ, вода) и объема между ними и топливными сборками путем установки вкладышей из алюминия или бериллия позволяет варьировать жесткость спектра нейтронов в зависимости от задач эксперимента. Допустимое число ловушек определяется запасом реактивности реактора, т. е. объемом его активной зоны. При выборе ячеек для экспериментальных каналов в активной зоне исходили из следующих требований: получение возможно высокого значения потоков нейтронов во всех каналах; возможно меньшего влияния на характеристики каналов органов регулирования при одновременном обеспечении достаточной их эффективности.

При заданном объеме активной зоны, определяемом размером бассейна, и с учетом этих требований в активной зоне размещается 8 экспериментальных каналов (см. рис. 2). Остальные шесть каналов размещаются в водяном отражателе вблизи боковых граней активной зоны, свободных от органов СУЗ. Характеристика экспериментальных каналов реактора представлена в таблице. Эффективная плотность потока тепловых нейтронов [3] измерена

Рис. 2. Картограмма активной зоны реактора:

1 — ионизационная камера; 2 — экспериментальные каналы; 3 — стержень АР; 4 — поглощающая пластина АЗ-КО; 5 — топливная сборка; 6 — защитные экраны датчиков СУЗ; 7 — датчики импульсных каналов

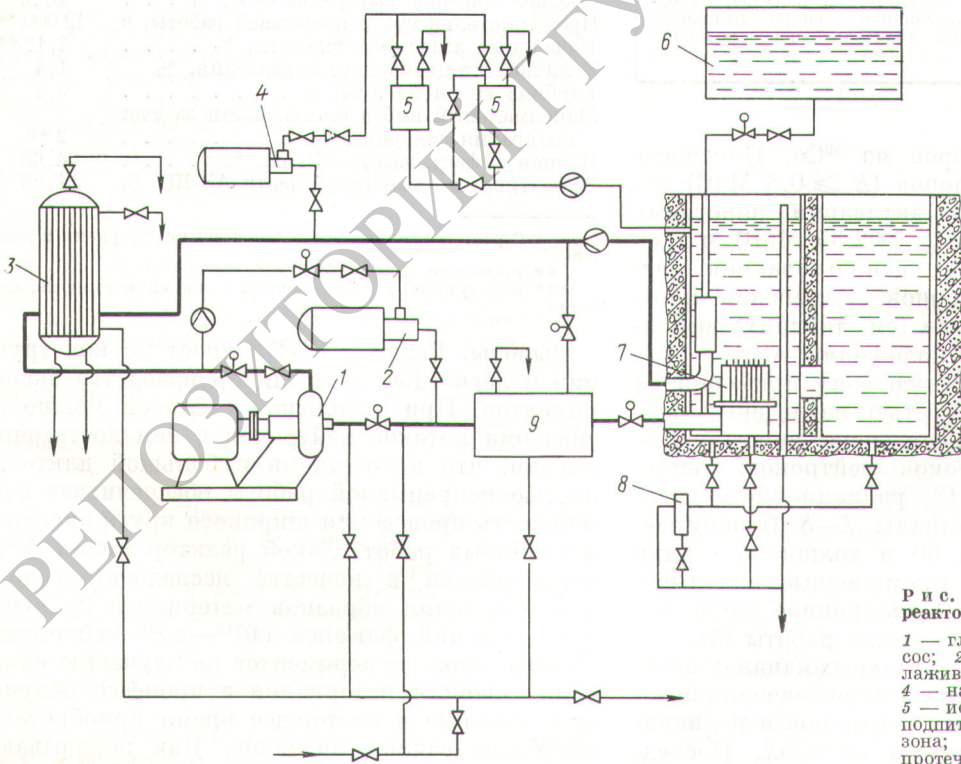
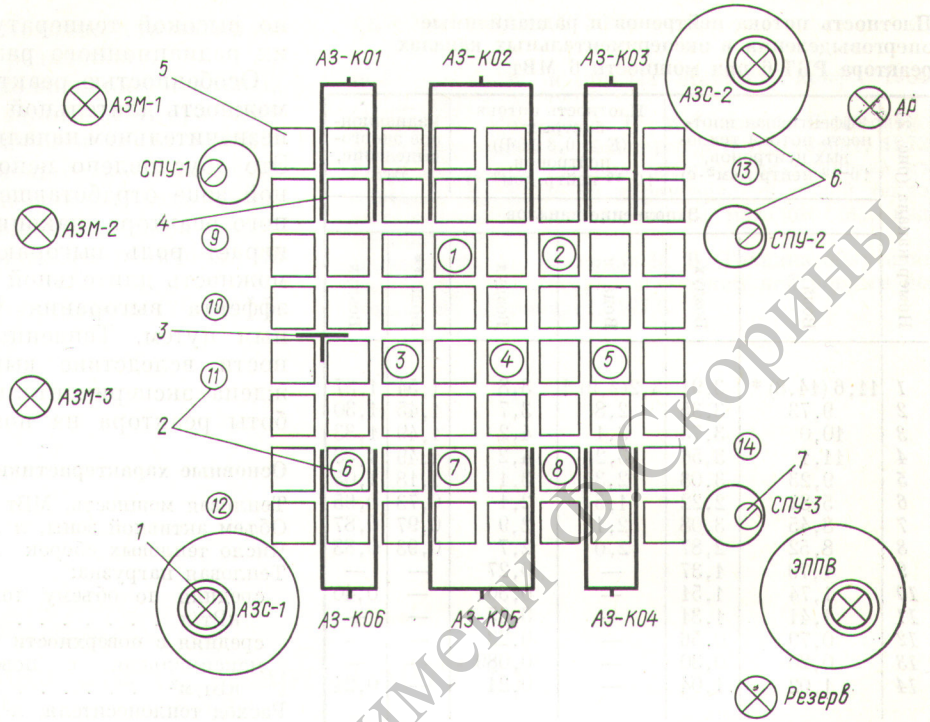


Рис. 3. Технологическая схема реактора:

1 — главный циркуляционный насос; 2 — насос аварийного расхолаживания; 3 — теплообменник; 4 — насос контура спецочистки; 5 — ионообменные фильтры; 6 — подпиточный бак; 7 — активная зона; 8 — бачок — сигнализатор протечек бака реактора; 9 — гаситель кислородной активности

**Плотность потока нейтронов и радиационные энерговыделения в экспериментальных каналах реактора РБТ-6 при мощности 6 МВт**

Номер канала (рис. 2)	Эффективная плотность потока тепловых нейтронов, $10^{-13}$ нейтр./см <sup>2</sup> .с		Плотность потока быстрых нейтронов ( $E \geq 0,8$ МэВ), $10^{-13}$ нейтр./см <sup>2</sup> .с		Радиационное энерговыделение, Вт/г	
	Заполнение каналов					
	Вода	Воздух	Вода	Воздух	Вода **	Воздух
1	11,6 (14,8) *	3,91	3,2(2,9) *	3,8	1,54	1,37
2	9,73	3,35	2,8	3,7	1,45	1,30
3	10,0	3,75	3,1	4,2	1,49	1,33
4	11,1	3,56	3,2	4,2	1,49	1,33
5	9,23	3,08	2,3	3,1	1,18	1,05
6	5,82	2,22	1,5	2,1	0,73	0,65
7	8,45	3,08	2,1	2,9	0,97	0,87
8	8,52	2,87	2,0	2,7	0,93	0,83
9	1,79	1,37	—	0,27	—	—
10	1,74	1,51	—	0,30	—	0,40
11	1,41	1,31	—	0,25	—	—
12	0,79	0,56	—	0,23	—	—
13	0,20	0,30	—	0,089	—	—
14	1,02	1,04	—	0,21	—	0,24

\* Ловушка заполнена водой.  
 \*\* Получено пересчетом значений для каналов, заполненных воздухом, с использованием экспериментального соотношения энерговыделений в канале 6 при заполнении его водой и воздухом.

по активации детекторов из <sup>59</sup>Со. Плотность потока быстрых нейтронов ( $E \geq 0,8$  МэВ) получена из измерения активации пороговых детекторов из <sup>58</sup>Ni ( $E_{эф} = 2,35$  МэВ) и последующего пересчета с использованием расчетного спектра нейтронов. Измерения плотности потоков нейтронов (см. таблицу) выполнены при следующем положении АЗ-КО: 1—3 — введены в актуальную зону примерно на 1/2 хода; 4—6 — полностью извлечены; максимальная относительная погрешность значений плотности потоков нейтронов: тепловых — 8, быстрых — 13, радиационного энерговыделения — 6%; каналы 1—8 (алюминиевые трубы диаметром 60 и толщиной стенки 3 мм) установлены в алюминиевые вкладыши сечением 69 × 69 мм. Радиационное энерговыделение измерено по методике работы [4].

В основных экспериментальных каналах реактора РБТ-6 достигаются высокие значения потоков тепловых и быстрых нейтронов и радиационного энерговыделения в каналах. Последние позволяют облучать образцы при достаточ-

но высокой температуре, достигаемой за счет их радиационного разогрева.

Особенностью реактора РБТ-6 является возможность длительной непрерывной работы при незначительном начальном запасе реактивности. Это обусловлено использованием в его активной зоне отработавшего топлива высокотемпературного реактора, накопившийся в котором <sup>149</sup>Sm играет роль выгорающего поглотителя. Возможность длительной работы реактора за счет эффекта выгорания <sup>149</sup>Sm получена расчетным путем. Тенденция возрастания реактивности вследствие выгорания <sup>149</sup>Sm подтверждена экспериментально на первом этапе работы реактора на номинальной мощности.

**Основные характеристики реактора РБТ-6:**

Тепловая мощность, МВт	6
Объем активной зоны, л	132 *
Число тепловых сборок	56
Тепловая нагрузка:	
средняя по объему топливных сборок, кВт/л	62,5
средняя с поверхности твэла, кВт/м <sup>2</sup>	88
максимальная с поверхности твэла, кВт/м <sup>2</sup>	400
Расход теплоносителя, м <sup>3</sup> /ч	550
Скорость теплоносителя, м/с	0,9
Среднее начальное выгорание <sup>235</sup> U, %	30
Среднее конечное выгорание <sup>235</sup> U, %	37,4 **
Продолжительность непрерывной работы, ч	12 000 **
Начальный запас реактивности, %	2,12 ***
Величина стационарного отравления, %	1,4
Глубина «иодной» ямы, %	0,1
Максимальный выбег реактивности за счет выгорания самария, %	2 **
Полная эффективность АЗ-КО, %	4,68
Эффективность аварийной части АЗ-КО, %	1,56

\* С учетом зазоров между топливными сборками и ловушкой.

\*\* Расчетное значение.

\*\*\* В ловушках газовые каналы с алюминиевыми вкладышами.

**Выводы.** Реактор РБТ-6 прост по конструкции и легко доступен для производства экспериментов. При небольшой тепловой мощности значения потоков нейтронов в нем достаточно высоки, что в сочетании с большой длительностью непрерывной работы обеспечивает возможность проведения широкого круга экспериментальных работ. Такой реактор может быть рекомендован в качестве исследовательского для облучения образцов материалов до средних значений флюенса ( $10^{19}$ — $10^{21}$  нейтр./см<sup>2</sup>) и проведения экспериментов по изучению изменения свойств материалов в процессе облучения, которые в настоящее время приобретают все более важное значение. Как показывают оценки, количество отработавших топливных

сборок реактора СМ-2 достаточно для эксплуатации нескольких таких реакторов.

При необходимости число экспериментальных каналов в активной зоне такого реактора можно повысить за счет увеличения числа топливных сборок и тепловой мощности. В качестве бокового отражателя можно использовать бериллий. Это приведет к уменьшению объема активной зоны и тепловой мощности реактора, но повысит его стоимость.

Поступила в Редакцию 17/1 1977 г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фейнберг С. М. и др. III Женевск. конф., 1964. Докл. СССР № 320.
  2. Бать Г. А., Коченов А. С., Кабанов Л. П. Исследовательские ядерные реакторы. М., Атомиздат, 1972.
  3. Государственная система обеспечения единства измерений. Определение характеристик полей тепловых нейтронов активационным методом. М., изд. ВНИИФТРИ, 1972.
  4. Цыканов В. А., Самсонов Б. В. Техника облучения материалов в реакторах с высоким нейтронным потоком. М., Атомиздат, 1973.
- Вайскопф В. Физика в двадцатом столетии (США, Англия, 1972 г.). Пер. с англ. М., Атомиздат, 1977. 21 л. 2 р. 30 к. В пер.
- Кондрашов А. П., Шестопапов Е. В. Основы физического эксперимента и математическая обработка результатов измерений. Учебник для техникумов. М., Атомиздат, 1977. 44 л. 65 к. В пер.
- Справочник по экстракции. В 3-х т. Под общ. ред. д-ра хим. наук А. М. Розена. Т. 2. Межов Э. А. Экстракция аминами, солями аминов и четвертичных аммониевых оснований. М., Атомиздат, 1977. 35 л. 2 р. 10 к. В пер.
- Поликанов С. М. Изомерия формы атомных ядер. М., Атомиздат, 1977. 40 л. 1 р.
- Диденко А. Н., Григорьев В. П., Усов Ю. П. Мощные электронные пучки и их применение. М., Атомиздат, 1977. 45 л. 1 р. 70 к. В пер.
- Крейндель Ю. А. Плазменные источники электронов. М., Атомиздат, 1977. 40 л. 1 р.
- Бранкер К., Джорна С. Управляемый лазерный синтез (США, 1973 г.). Пер. с англ. М., Атомиздат, 1977. 8 л. 80 к.
- Голант В. Е., Жилинский А. П., Сахаров И. Е. Основы физики плазмы. М., Атомиздат, 1977. 25 л. 2 р. 70 к. В пер.
- Михайловский А. В. Теория плазменных неустойчивостей. В 2-х т. Т. 2. Неустойчивости неоднородной плазмы. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., Атомиздат, 1977. 49 л. 2 р. 40 к. В пер.
- Дорощик В. Е. Ядерные реакторы на электростанциях. М., Атомиздат, 1977. 16 л. 1 р. 80 к. В пер.
- Кузнецов В. А. Ядерные реакторы космических энергетических установок. М., Атомиздат, 1977. 46 л. 1 р. 80 к. В пер.
- Сурков Ю. А. Гамма-спектрометрия в космических исследованиях. М., Атомиздат, 1977. 45 л. 1 р. 70 к. В пер.
- Методы изучения реакторных характеристик на критических сборках БФС. М., Атомиздат, 1977. 6 л. («Техника ядерных реакторов»). 60 к. Авт.: Казанский Ю. А., Дулин В. А., Белов С. П. и др.
- Борин Л. Л., Карелин А. И. Термодинамика окислительно-восстановительных процессов в технологии актиноидов. Под ред. В. С. Колтунова. М., Атомиздат, 1977. 48 л. 2 р. В пер.
- Лантаноиды и актиноиды. Под ред. К. Бэгналла. (Англия, 1972 г.). Сокр. пер. с англ. М., Атомиздат, 1977. 46 л. 1 р. 80 к. В пер.
- Морохов И. Д., Трусов Л. И., Чижик С. П. Металлические ультрадисперсные среды. М., Атомиздат, 1977. 48 л. 2 р. В пер.
- Мейльман М. Л., Самойлович М. И. Введение в спектроскопию ЭПР активированных монокристаллов. М., Атомиздат, 1977. 13 л. 1 р. 50 к. В пер.
- Шалаев А. М., Адаменко А. А. Радиационно-стимулированное изменение электронной структуры металлов. М., Атомиздат, 1977. 13 л. 1 р. 50 к. В пер.
- Коваль Ю. Ф. Радиоактивные нуклиды в медико-биологических исследованиях. (Краткое руководство для научных работников). М., Атомиздат, 1977. 7 л. 70 к.
- Шуклолюков Ю. А. Часы на миллиард лет. М., Атомиздат, 1977. 10 л. 35 к.
- Френкель В. Я. Пауль Эрэнфест. Изд. 2-е. М., Атомиздат, 1977. 15 л. 70 к. В пер.
- Проблемы теории гравитации и элементарных частиц. Сб. статей. Вып. 8. Под ред. К. П. Станюковича. М., Атомиздат, 1977. 14 л. 1 р. 40 к.
- Химия плазмы. Сб. статей. Вып. 4. Под ред. Б. М. Смирнова. М., Атомиздат, 1977. 20 л. 2 р. 20 к. В пер.

## Новые книги Атомиздата (II квартал 1977 г.)