



**НИИАР**

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР —  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ**

**ГОСКОРПОРАЦИЯ «РОСАТОМ»**

**50**

**лет реактору**

**МИИР**

Димитровград  
2017

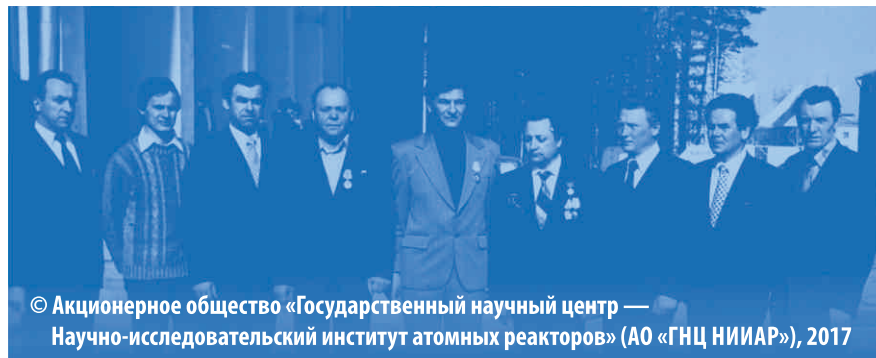
УДК 621.039.55

ГРНТИ 58.33

БКБ 31.46

50 лет реактору МИР: рекламное издание. —

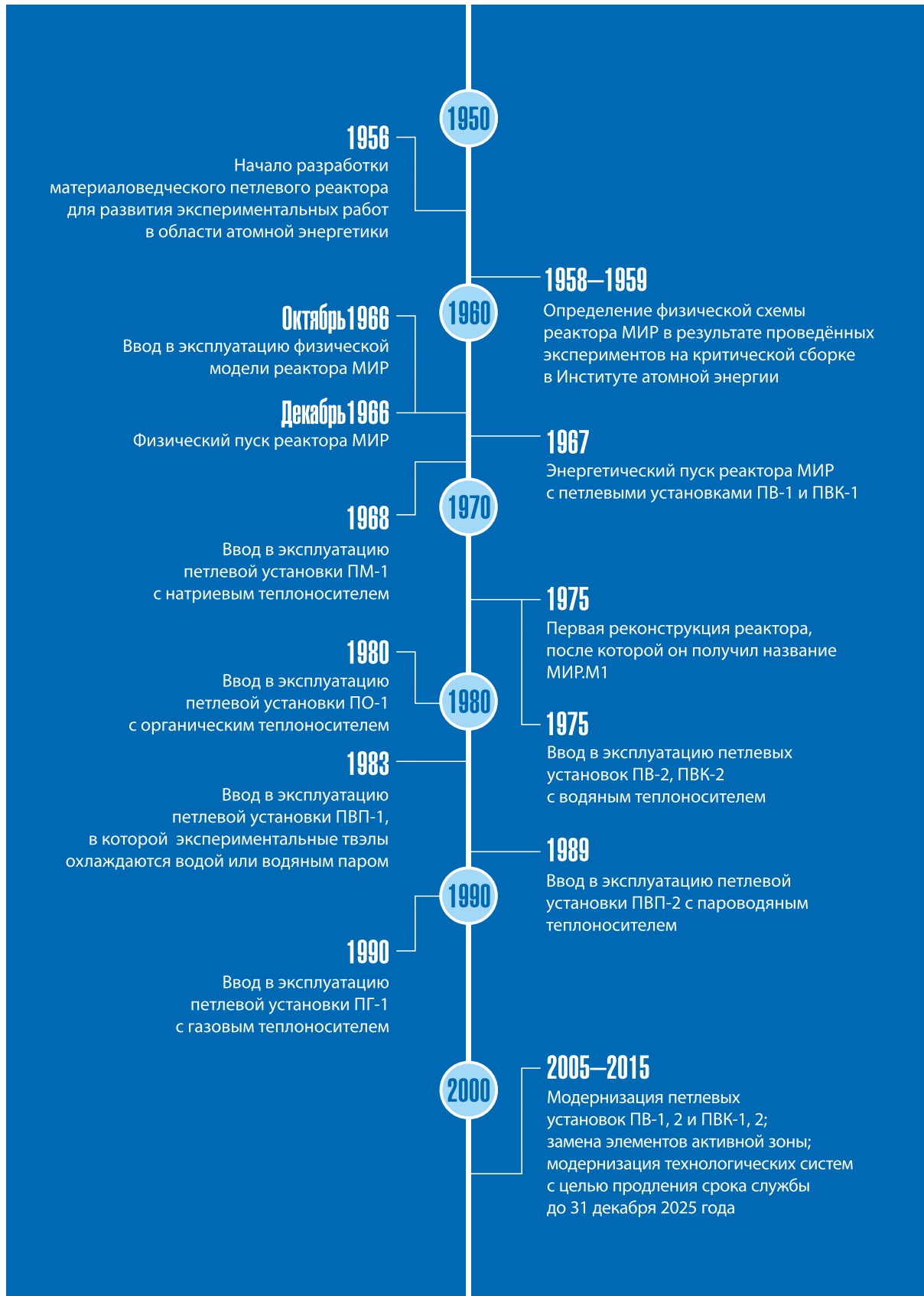
Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2017. — 24 с.



ISBN 978-5-94831-157-9

© Акционерное общество «Государственный научный центр —  
Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР»), 2017

# 50 лет реактору МИР



# Реактор МИР. М1



**Основное назначение многопетлевого материаловедческого реактора МИР. М1 — испытания тепловыделяющих элементов и тепловыделяющих сборок для энергетических и исследовательских реакторов различных типов в стационарных и переходных режимах, а также при моделировании аварийных ситуаций**

## **В настоящее время в реакторе МИР. М1 используется семь петлевых установок:**

- две высокотемпературные водяные петлевые установки;
- две высокотемпературные петлевые установки с кипящей водой;
- две пароводяные петлевые установки для испытаний экспериментальных ТВЭЛов и тепловыделяющих сборок в аварийных условиях;
- петлевая установка с газовым теплоносителем для испытаний ТВЭЛов и материалов высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов.

## **В здании реактора также расположены:**

- физическая модель реактора для экспериментального определения нейтронно-физических условий испытаний под облучением;
- две защитные камеры для неразрушающих исследований ТВЭЛов, работ с экспериментальными устройствами и ТВС, их разделки с целью дальнейших исследований или для утилизации;
- лаборатория для подготовки и анализа показателей качества теплоносителя и измерения активности продуктов деления.



# Характеристики реактора МИР. М1

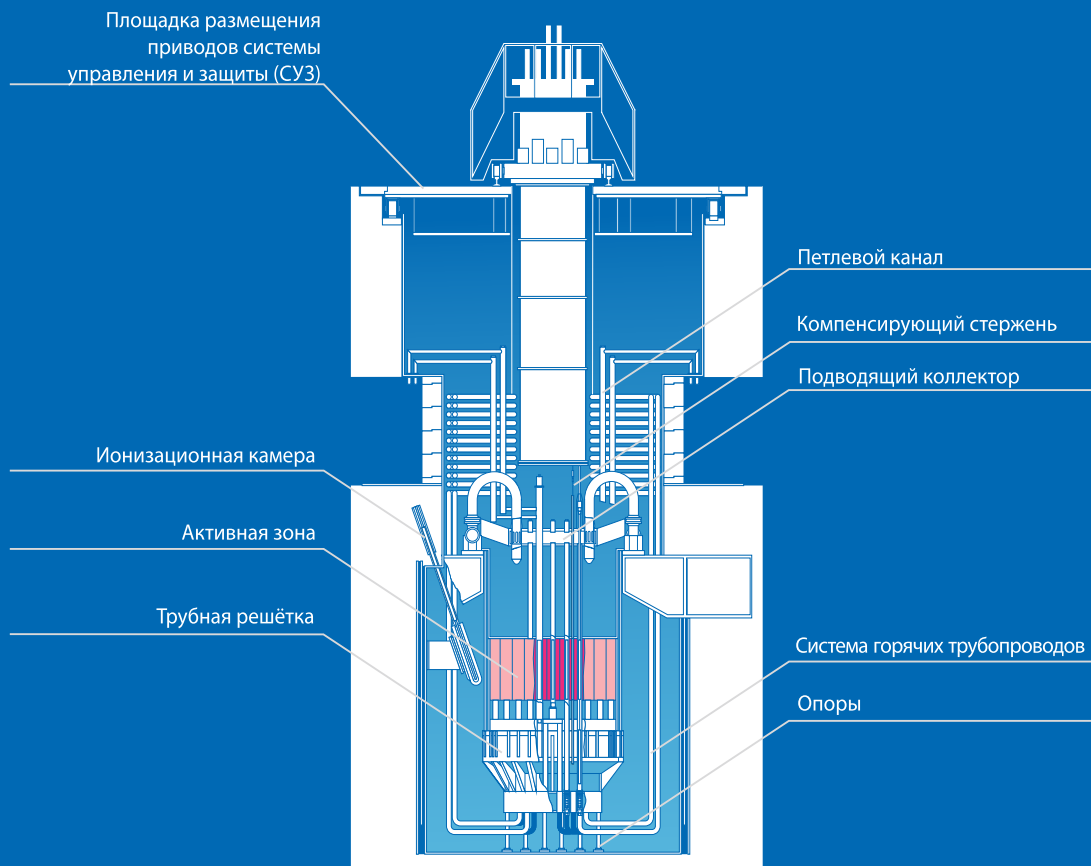
Реактор МИР. М1 — канального типа с активной зоной, расположенной в бассейне с водой. Активная зона набирается в шестигранных бериллиевых блоках (размер под ключ — 148,5 мм), по оси которых размещены циркониевые каналы для рабочих топливных сборок и петлевые каналы для экспериментальных сборок. Рабочая топливная сборка состоит из четырёх кольцевых концентрично расположенных топливных элементов с керамическим дисперсионным топливом (смесь  $UO_2$  и Al) в оболочке из алюминиевого сплава.

Для изменения реактивности используются подвижные топливные сборки, соединённые с поглотителями. Компенсирующие стержни, расположенные в отверстиях на стыках бериллиевых блоков, также применяются для регулирования мощности реактора и петлевых каналов. Существует возможность размещения экспериментальных устройств в активной зоне реактора без использования петлевых каналов.

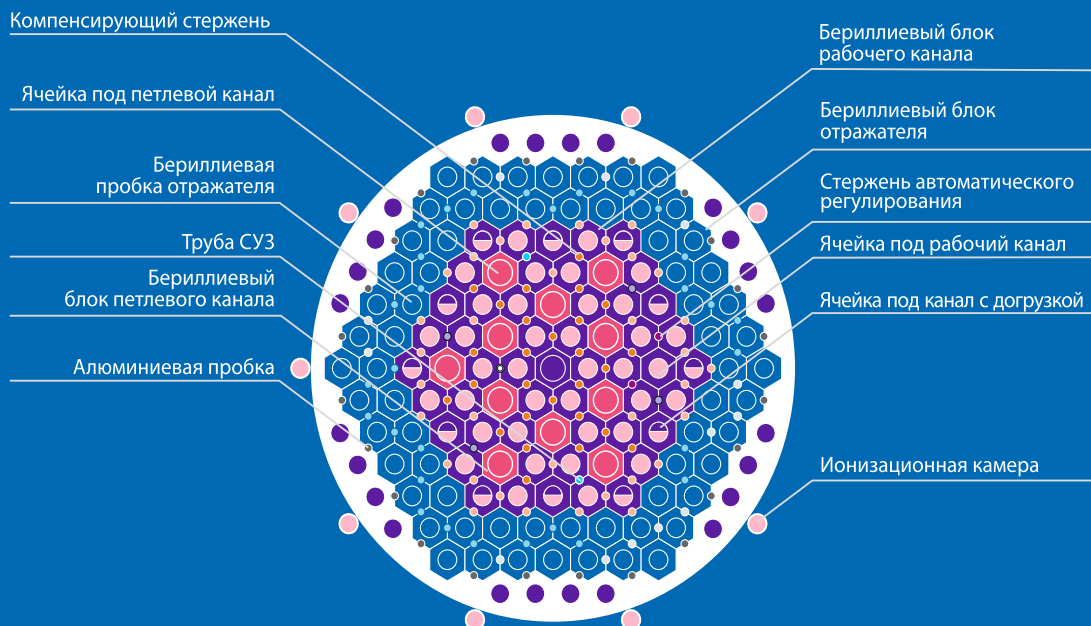
## Технические характеристики

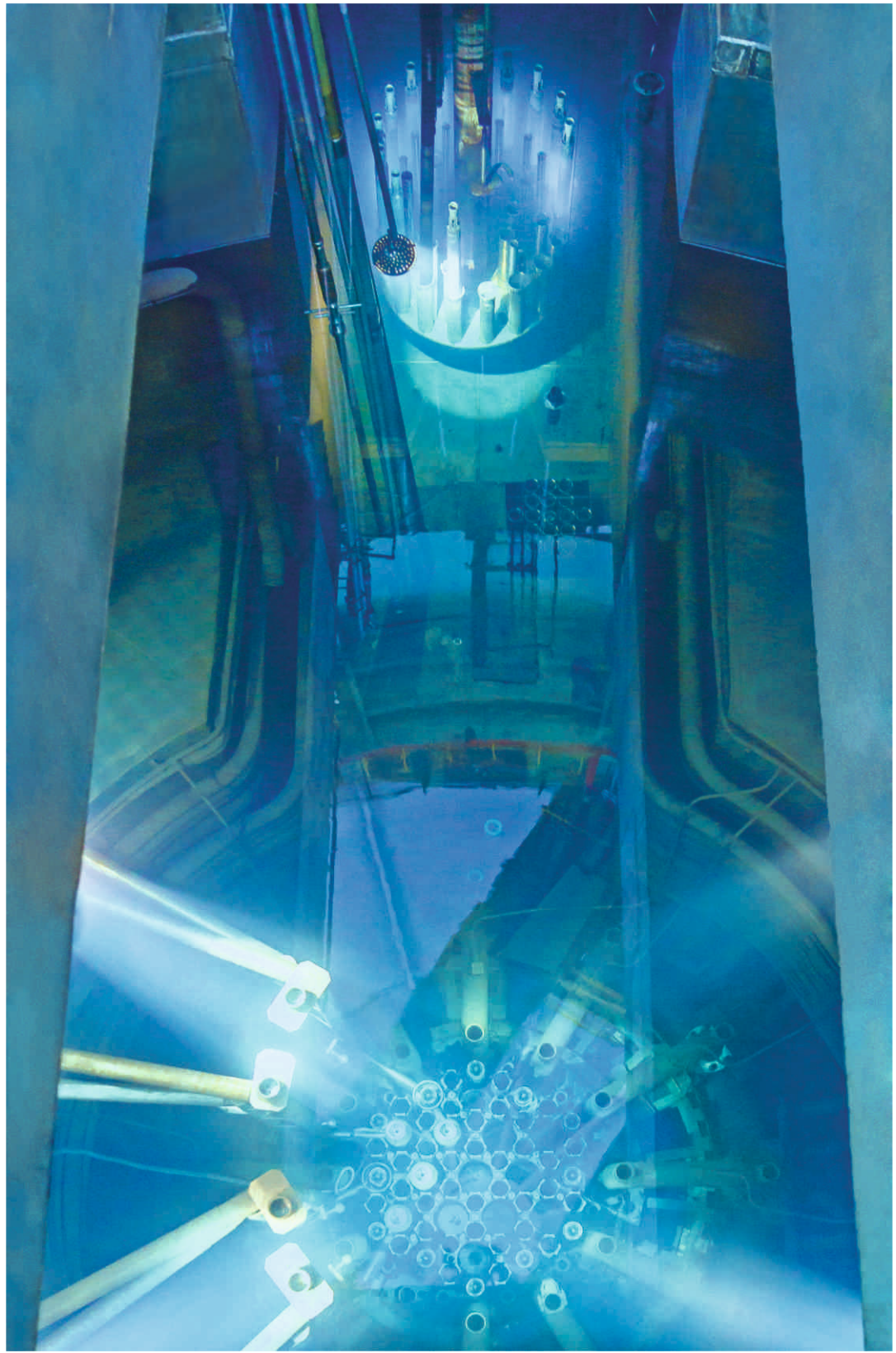
Характеристика	Значение
Максимальная тепловая мощность, МВт	100
Максимальная плотность потока нейтронов, $m^{-2}\cdot c^{-1}$	$5 \cdot 10^{18}$
Топливо	$UO_2$ в алюминиевой матрице
Обогащение по урану-235, %	90
Замедлитель	Бериллий, вода
Отражатель	Бериллий
Теплоноситель первого контура	Вода
Температура, °С:	
на входе в активную зону	30–70
на выходе из активной зоны	До 98
Расход теплоносителя, $m^3/ч$	Не более 3000
Давление теплоносителя на входе, МПа	1,25
Количество стержней, шт.:	
автоматического регулирования	2
компенсации реактивности	22
аварийной защиты	6
Количество каналов с подвижными топливными сборками, шт.	12
Доля выгоревшего урана-235, %:	
в активной зоне	20–25 (среднее)
в выгруженном топливе	До 60
Количество петлевых каналов, шт.:	
с водой под давлением	4
с кипящей водой	4
с паром и водой	1–2
газовых	1
Работа на мощности, сут/год	До 240

## Вертикальный разрез реактора



## Горизонтальный разрез активной зоны





# Петлевые установки

В реакторе МИР. М1 эксплуатируются семь петлевых установок, каждая из которых соединена с одним или двумя петлевыми каналами. В каналах размещаются экспериментальные устройства с твэлами, макетами топливных сборок или с конструкционными элементами ТВС.

## Оборудование петлевых установок:

- циркуляционный контур (насосы, теплообменники, компенсаторы давления, сепаратор, конденсаторы);
- системы контроля герметичности оболочки (по запаздывающим нейтронам и гамма-активности теплоносителя);
- системы ввода химических реагентов в теплоноситель, подпитки, пробоотбора теплоносителя и ионообменные фильтры;
- системы аварийного теплоотвода;
- оборудование для обеспечения вакуумной теплоизоляции петлевых каналов;
- системы для измерения и регистрации параметров испытаний в онлайн-режиме.

## Характеристики петлевых установок

Характеристика	ПВ-1	ПВ-2	ПВК-1	ПВК-2	ПВП-1	ПВП-2	ПГ-1
Количество каналов	2	2	2	2	1	1	1
Теплоноситель	Вода	Вода	Вода, кипящая вода	Вода, кипящая вода	Вода, пар	Вода, пар	Гелий+ксенон, азот
Давление, МПа	16,8	17,8	16,8	17,8	8,5	20	20
Температура, °С	350	350	350	355	500	550	600
Расход, кг/ч	16 000	16 000	14 000	14 000	675	10 000	4 680

Примечание. Для последних трёх параметров приведены максимальные значения.

## Типы экспериментов:

- испытания со скачкообразным увеличением мощности (RAMP);
- изменение мощности в режиме импульса (RIA);
- ресурсные и сравнительные испытания в различных водно-химических условиях;
- испытания с маневрированием мощности;
- сравнительные испытания конструкционных элементов;
- эксперименты с потерей теплоносителя (LOCA);
- дооблучение рефабрикованных и полномасштабных твэлов.



## Схема управления испытаниями в петлевых установках

Пульт управления петлевой установкой



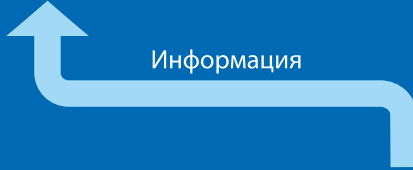
Пульт управления реактором



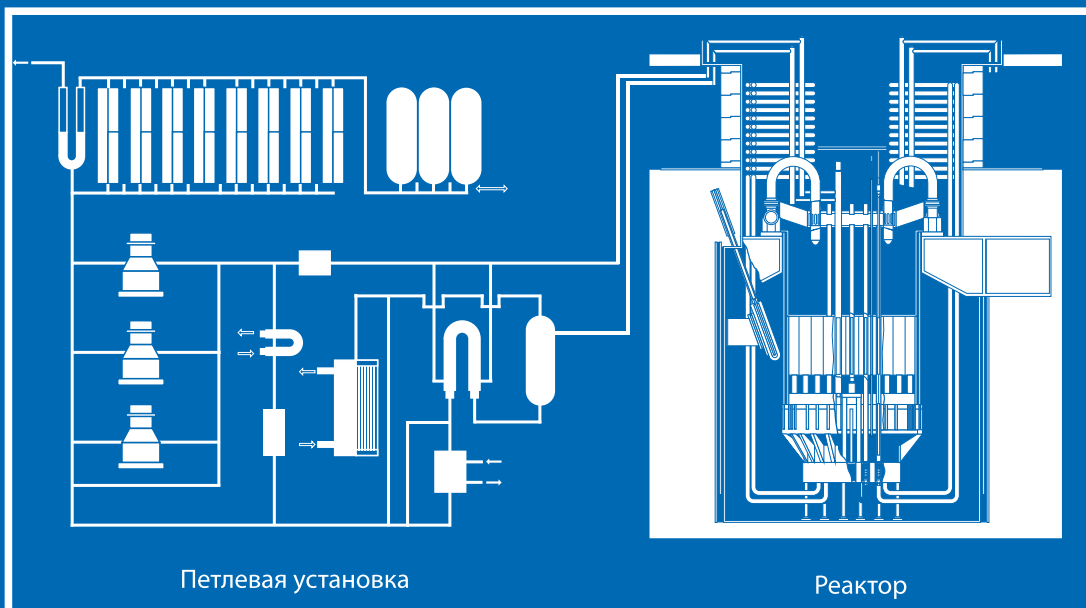
Управление



Информация



Управление



Петлевая установка

Реактор

# Критическая сборка реактора МИР. М1

Критическая сборка является физической моделью реактора МИР. М1. В пределах активной зоны и отражателя геометрические размеры и материальный состав критической сборки соответствуют реакторным.

Критическая сборка предназначена для изучения нейтронно-физических характеристик активной зоны и облучательных устройств, выбора средств и методов формирования режимов облучения, обоснования безопасных режимов эксплуатации реактора, получения экспериментальных данных для верификации методик и программ расчёта нейтронно-физических характеристик.



В активной зоне критической сборки размещают макеты петлевых каналов реактора МИР.М1. В эти каналы загружают экспериментальные тепловыделяющие сборки (ЭТВС) или их имитаторы для проведения исследований перед загрузкой в реактор.

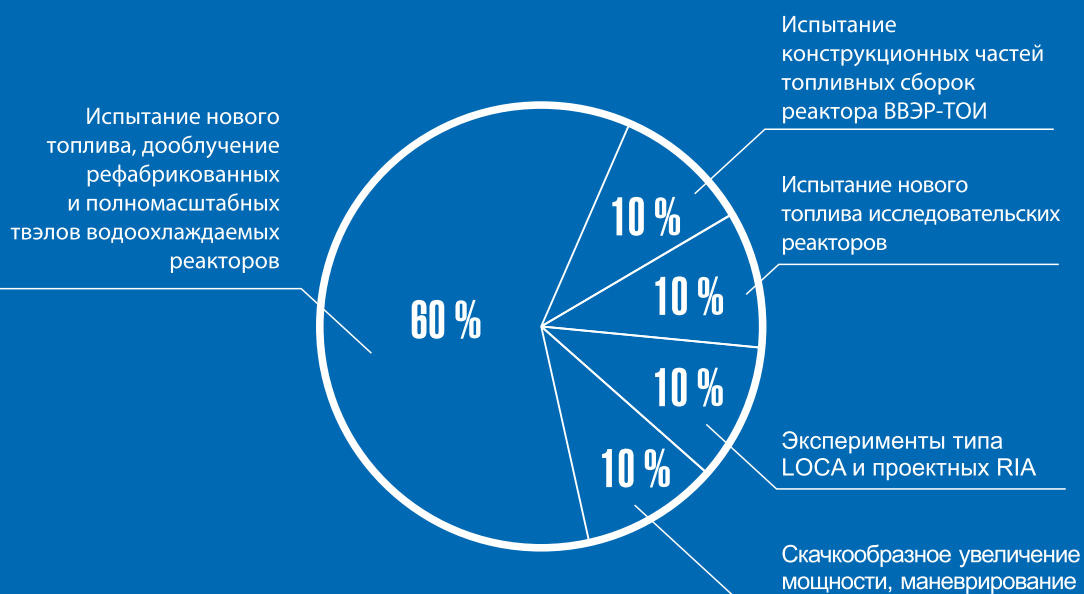
# Современные направления работ



Площадка размещения приводов СУЗ

- Разработка новых методик и проведение реакторных испытаний и исследований характеристик усовершенствованных твэлов для водо–водяных реакторов (ВВЭР; АЭС малой мощности; транспортных, плавучих энергоблоков) в нормальных, переходных, маневренных и аварийных режимах.
- Реакторные испытания и исследования характеристик твэлов и конструкционных материалов для реакторов типа PWR.
- Реакторные испытания твэлов и ТВС для высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов.
- Реакторные испытания твэлов и ТВС исследовательских реакторов.
- Реакторные испытания негерметичных твэлов для исследования механизмов выхода продуктов деления из твэлов.
- Промежуточные обследования ТВС и твэлов в защитных камерах и бассейне выдержки реактора.

## Основные направления работ на реакторе

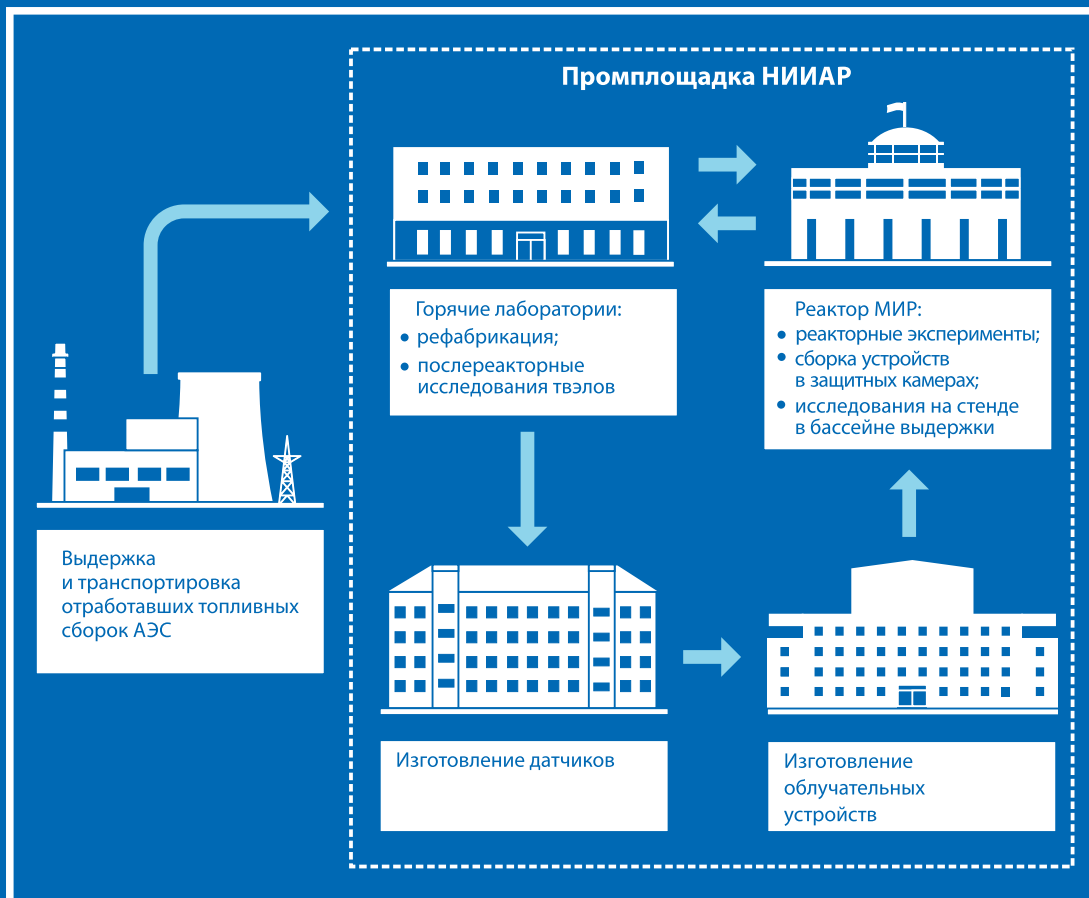


# Подготовка и испытание рефабрикованных и полномасштабных ТВЭЛОВ атомных электростанций

В АО «ГНЦ НИИАР» проводятся все необходимые работы для подготовки и проведения экспериментов:

- проектирование и изготовление экспериментальных и облучательных устройств, а также специальных датчиков и некоторых типов экспериментальных ТВЭЛОВ;
- определение характеристик облучённых полномасштабных и рефабрикованных ТВЭЛОВ, извлечённых из штатных или опытных ТВС энергетических реакторов;
- оснащение ТВЭЛОВ датчиками;
- внутриреакторные испытания;
- послереакторные и промежуточные исследования;
- утилизация отходов и временное хранение отработавшего топлива.

## Схема работ по подготовке и проведению эксперимента в реакторе МИР. М1



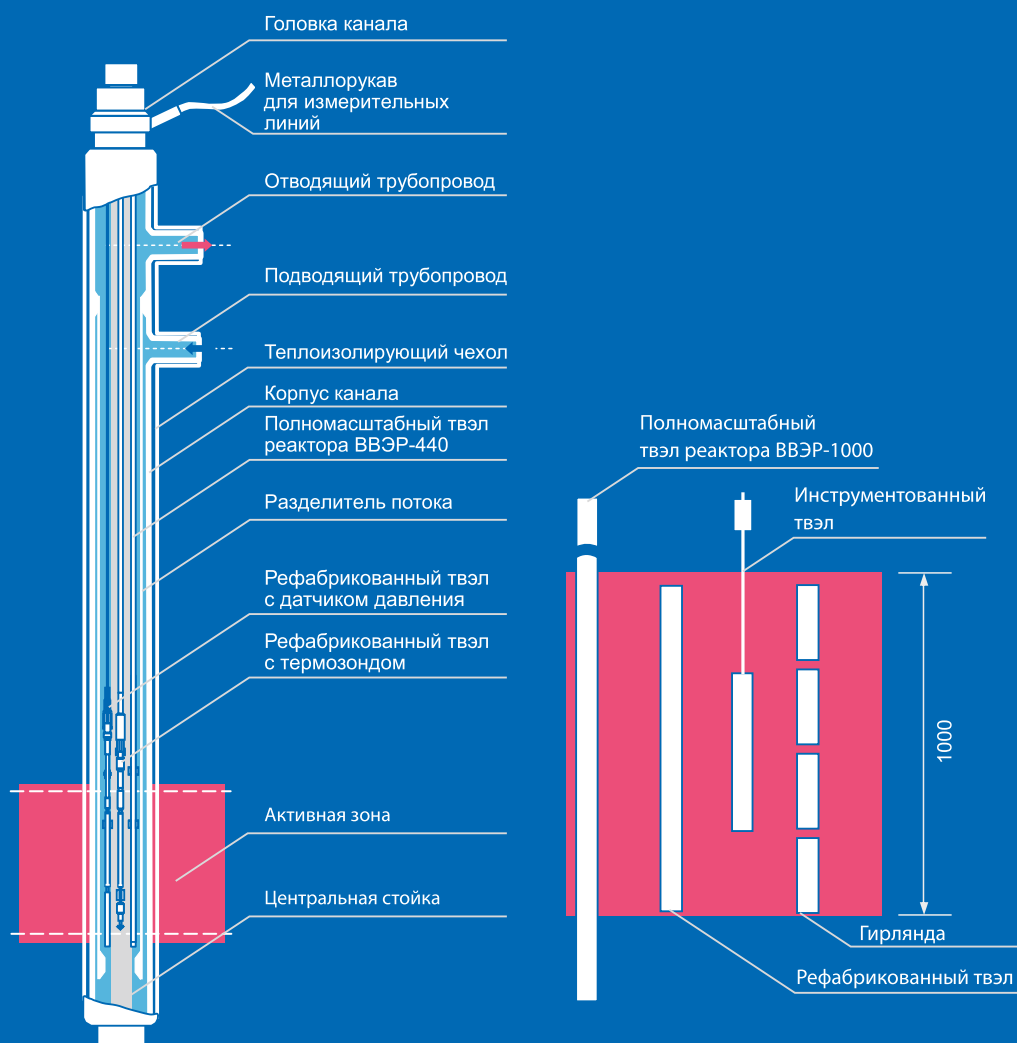


# Разборные устройства для испытаний полномасштабных и рефабрикованных ТВЭЛОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Для испытания топлива АЭС разработаны:

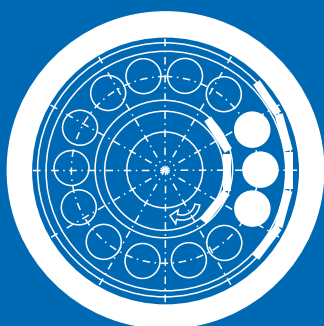
- несколько типов разборных и инструментованных устройств, содержащих до 19 рефабрикованных и полномасштабных ТВЭЛОВ;
- устройства с несколькими укороченными ТВЭЛАМИ, устанавливаемыми друг над другом по высоте активной зоны реактора (Гирлянда);
- устройства для дооблучения и специальных экспериментов с полномасштабными и рефабрикованными инструментованными ТВЭЛАМИ.

## Схема петлевого канала с различными экспериментальными ТВЭЛАМИ

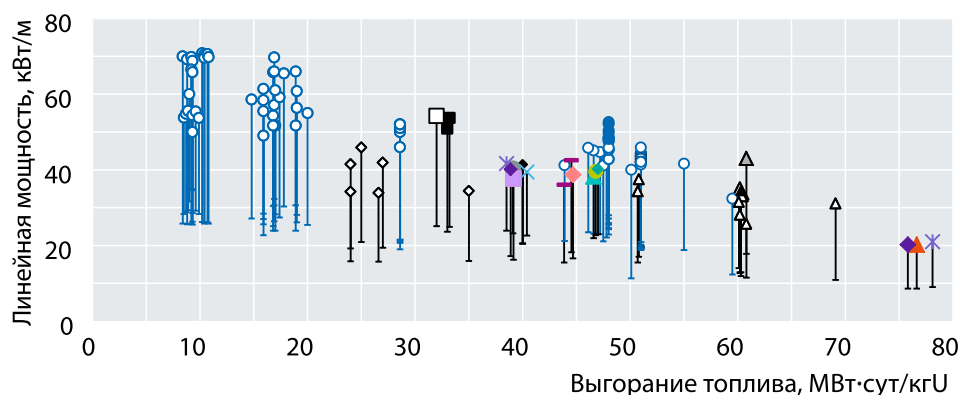


# Испытания в режиме скачкообразного увеличения мощности (RAMP)

Во время экспериментов мощность твэлов увеличивается в 1,5–3 раза за 1–30 мин в зависимости от моделируемого режима нарушения нормальной эксплуатации на АЭС. До 2010 года было проведено 12 таких экспериментов с твэлами реакторов ВВЭР. С 2012 года программа подобных экспериментов возобновлена и включает 16 экспериментов с твэлами усовершенствованной конструкции, пять из которых к настоящему времени проведены.



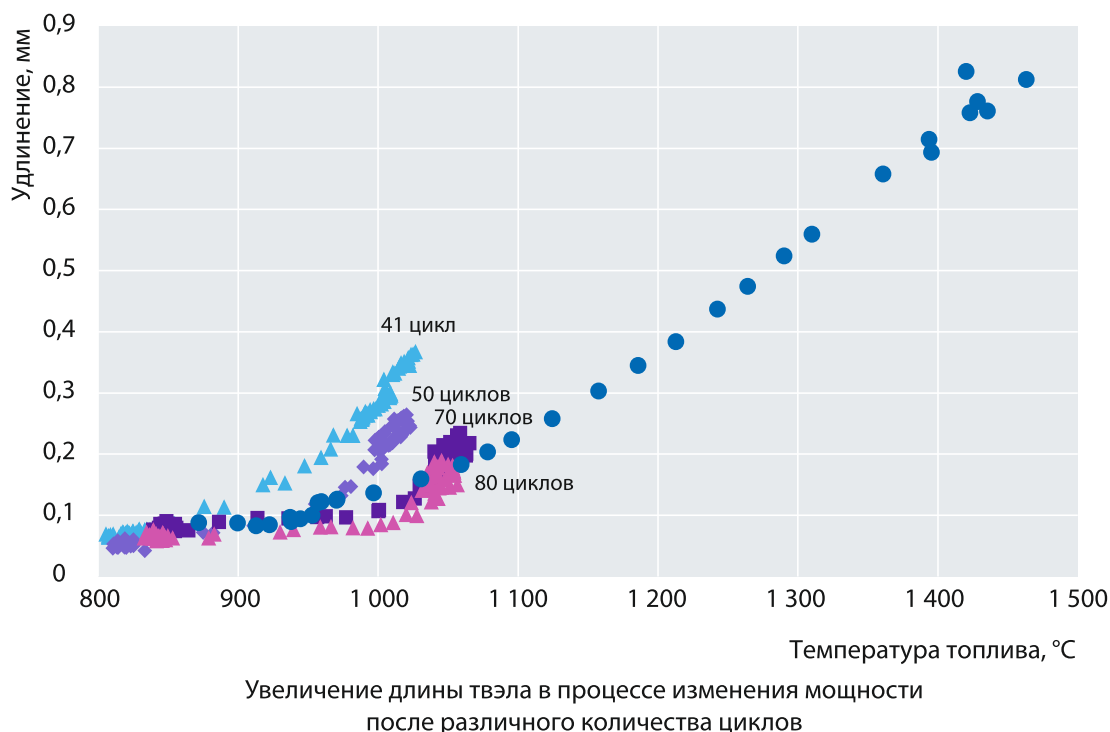
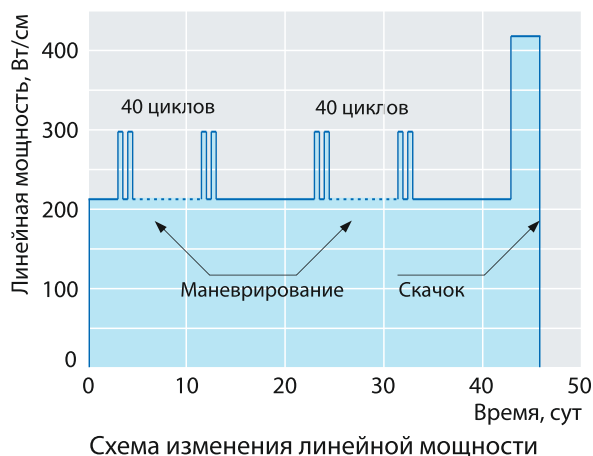
Сечение облучательного устройства с поворотом твэлов или экранов для испытаний твэлов в режиме с быстрым изменением мощности



Диапазоны изменения линейной мощности во время экспериментов с твэлами различных конструкций реактора ВВЭР

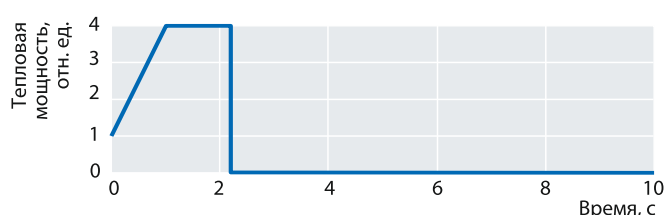
# Испытания в условиях маневрирования мощностью

Эксперименты с рефабрированными твэлами с выгоранием 50–60 МВт-сут/кгU для российских реакторов с водой под давлением (ВВЭР-440 и ВВЭР-ТОИ) проводились в условиях маневрирования мощностью. Два из четырёх твэлов реактора ВВЭР-ТОИ после экспериментов с маневрированием прошли испытания со скачкообразным увеличением мощности.

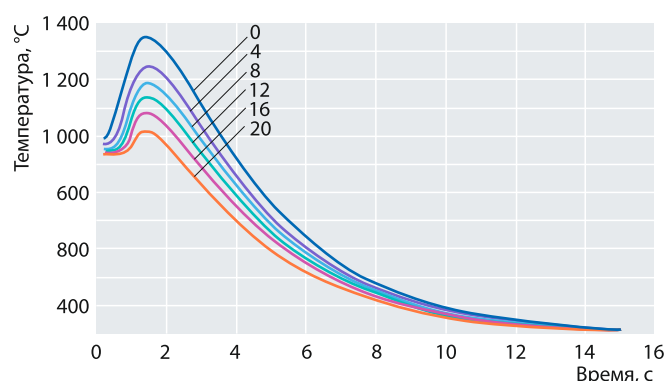


# Эксперименты в условиях проектной аварии, вызванной увеличением реактивности (RIA)

Импульс мощности формируется в одном канале реактора, работающего на постоянной мощности, путём перемещения поглощающего экрана, который окружает твэлы в начальном состоянии. Для компенсации эффекта реактивности в активную зону одновременно с основным экраном вводится дополнительный поглощающий элемент. Для передвижения экранирующей системы на высокой скорости (до 200 мм/с) разработан быстродействующий гидравлический привод. В экспериментальном инструментованном устройстве находятся три твэла, два из которых — рефабрикованные инструментованные твэлы реактора ВВЭР-1000 — с высоким выгоранием. Приращение энтальпии топлива определяют по амплитуде и длительности импульса при максимальной мощности.



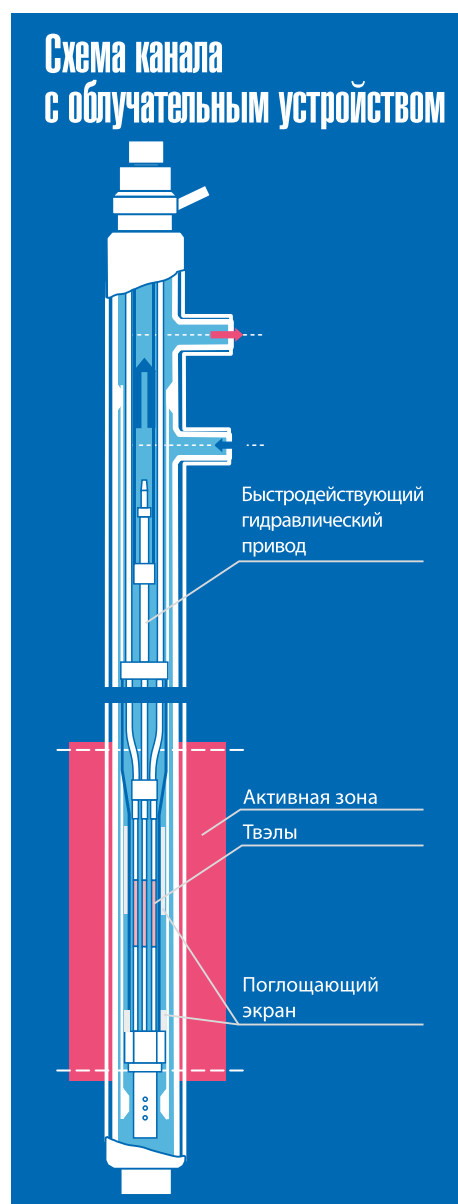
Форма импульса мощности



Изменение температуры топлива при импульсе мощности на различной высоте твэла (см)

## Условия испытания

Параметр	Значение
Давление теплоносителя, МПа	15,7
Температура теплоносителя, °С	До 310
Расход теплоносителя, м <sup>3</sup> /с	До 6
Начальная линейная тепловая мощность, Вт/см	До 250





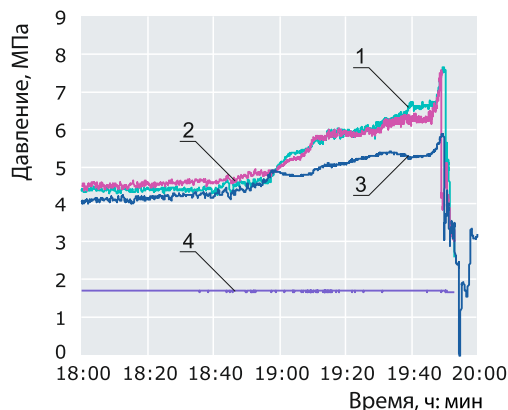
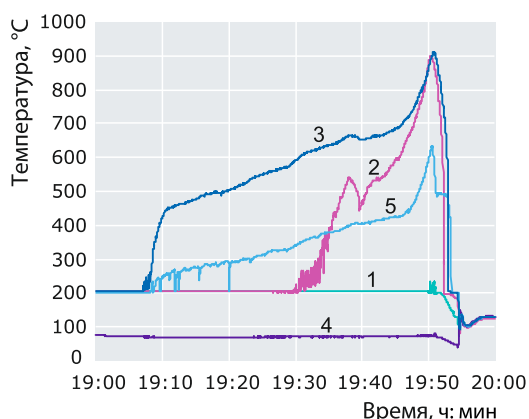
# Испытания фрагментов ТВС реактора ВВЭР-1000 в условиях проектной аварии ЛОСА

Испытания проводятся в герметичной петлевой установке реактора МИР. М1 при постоянном давлении и расходе теплоносителя.

Перепад давления на оболочке твэла достигается повышением начального давления гелия под оболочкой. Малый расход теплоносителя создаётся и измеряется специальной системой.

## В процессе испытания непрерывно измеряются параметры:

- температура теплоносителя на входе в пучок твэлов (4);
- температура теплоносителя на выходе из пучка твэлов (5);
- температура оболочки в различных точках по высоте твэла (1–3);
- температура центра топливного сердечника свежего и отработавшего топлива;
- давление газа под оболочкой (1–3) измеряется одновременно с температурой оболочки;
- давление теплоносителя (4).



Динамика изменения параметров в процессе эксперимента

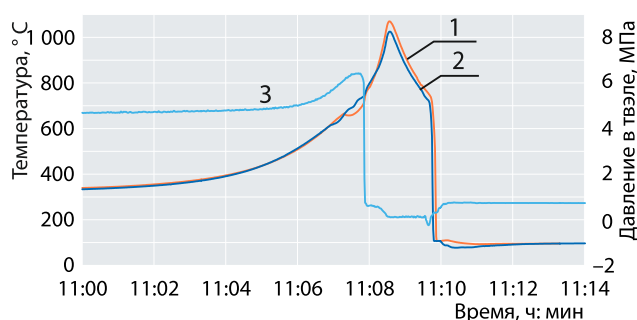
# Испытание одиночного ТВЭЛ реактора ВВЭР-1000 с высоким выгоранием топлива в условиях аварии типа LOCA

Одной из приоритетных задач реакторных экспериментов с имитацией условий аварии с потерей теплоносителя (LOCA) является изучение вопросов фрагментации высоковыгоревшего топлива, его осевого перемещения и выхода в теплоноситель при разрыве оболочки. В этом случае реакторные эксперименты с применением фрагментов ЭТВС не являются оптимальными. Неравномерности энерговыделения и охлаждения ТВЭЛов в пучке делают невозможным определение условий испытаний каждого ТВЭЛ с заданной степенью точности, необходимой для исследования процессов фрагментации, перемещения и диспергирования топлива.

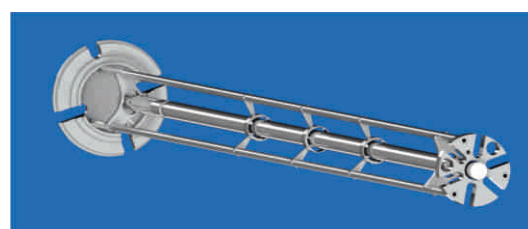
В последние годы разработана технология реакторного эксперимента с одним выгоревшим ТВЭЛом. Расположение ТВЭЛ по оси канала активной зоны реактора устраняет указанные ранее неравномерности.

## В процессе эксперимента в режиме реального времени измеряются:

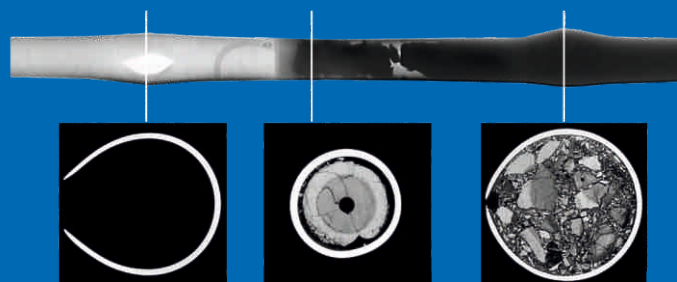
- температура теплоносителя на входе в активную часть (воды) и на выходе из активной части экспериментального устройства (водяного перегретого пара);
- температура оболочки ТВЭЛ на участках расположения дистанционирующих решёток (1, 2);
- относительное энерговыделение в канале (для измерения используются детектор прямого заряда с эмиттером, изготовленным из гафния, и штатные ионизационные камеры реактора);
- давление газа под оболочкой ТВЭЛ (3).



Измеряемые параметры ТВЭЛ  
в процессе эксперимента



Крепление ТВЭЛ в устройстве

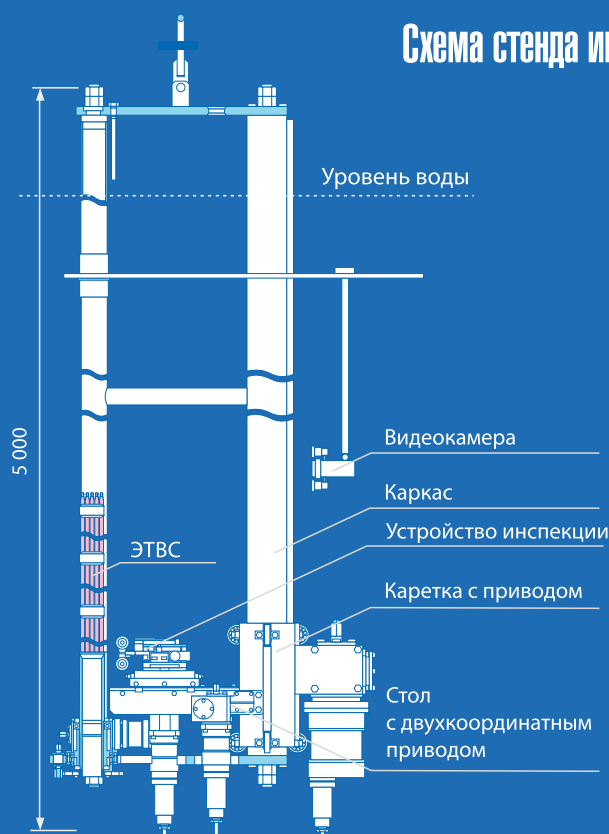


Состояние ТВЭЛ после эксперимента

Основной особенностью поведения высоковыгоревшего топлива в условиях аварии является повышенная фрагментация, приводящая к его перемещению и диспергированию через разрыв оболочки

# Исследования экспериментальных ТВЭЛов и ТВС с промежуточной инспекцией в бассейне выдержки реактора МИР.М1

## Схема стенда инспекции

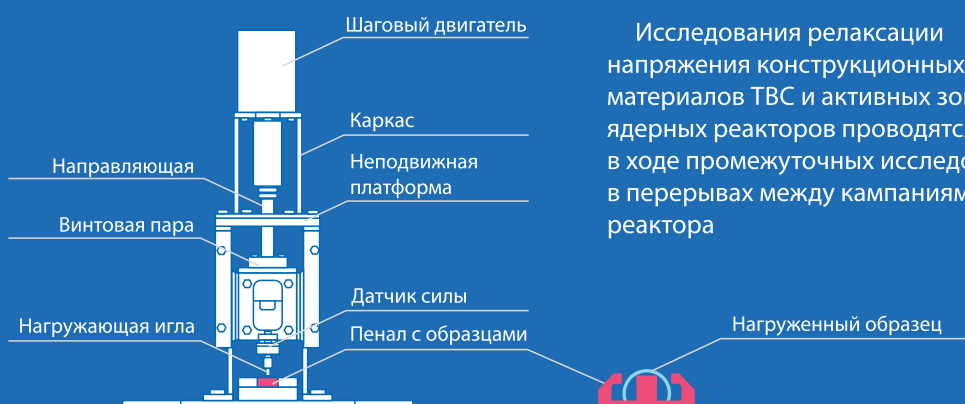


Стенд инспекции предназначен для выполнения промежуточных исследований в бассейне выдержки реактора МИР.М1 состояния ТВЭЛов и конструктивных элементов экспериментальных ТВС, облучаемых в петлевых установках реактора

### Возможности стенда инспекции:

- визуальный осмотр с видеофиксацией;
- измерение толщины оксидной плёнки;
- измерение геометрических параметров ТВЭЛов и конструктивных элементов

## Схема релаксометра

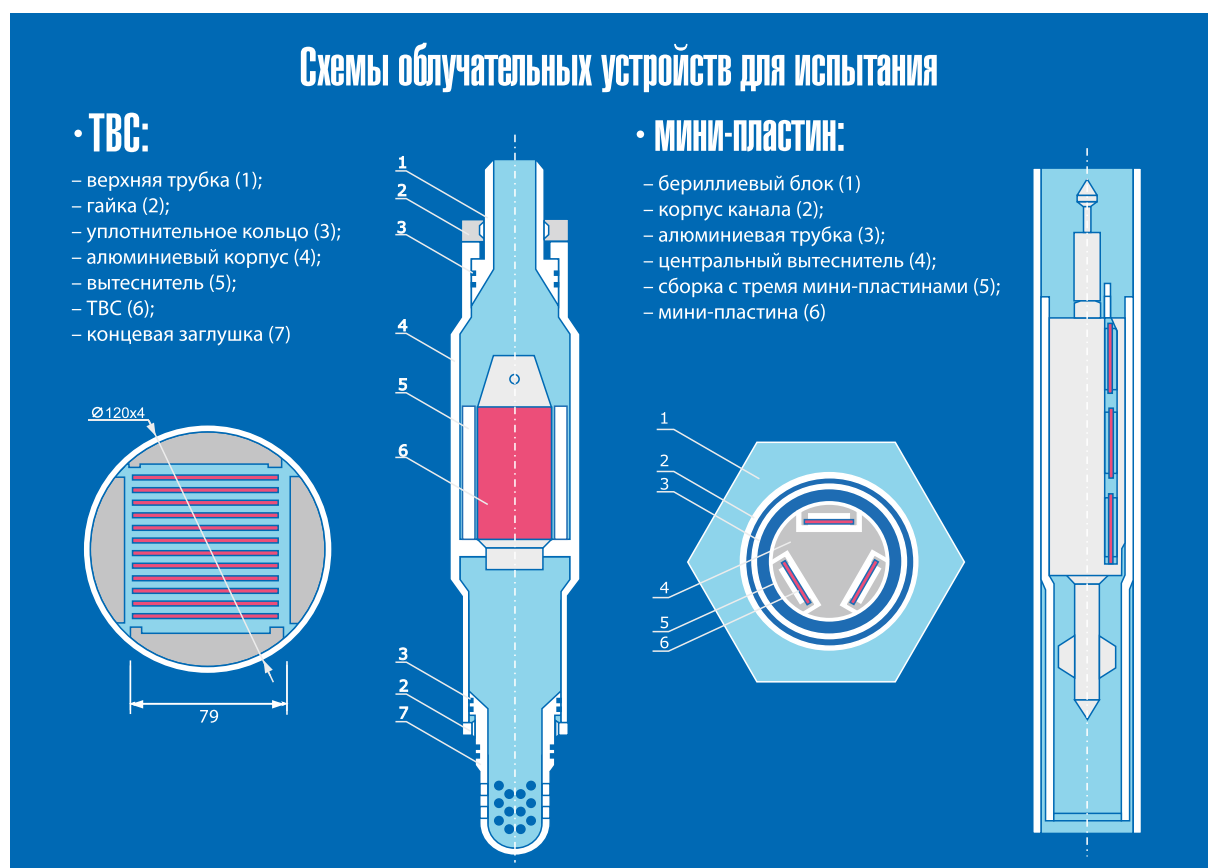


Исследования релаксации напряжения конструкционных материалов ТВС и активных зон ядерных реакторов проводятся в ходе промежуточных исследований в перерывах между кампаниями реактора

# Экспериментальная база для испытания и аттестации топлива исследовательских реакторов

За последние годы в реакторе МИР. М1 проведено несколько испытаний по аттестации топлива исследовательских реакторов типа МР и МТР. Испытания топлива при низких параметрах (при давлении около 1 МПа и температуре примерно 50 °С) проводят с подключением экспериментальных каналов к первому контуру реактора. Экспериментальные каналы использовали, в частности, для аттестации пластинчатого топлива реакторов типа МТР (два облучательных устройства для внутриреакторных испытаний фрагментов пластинчатых твэлов и полномасштабных тепловыделяющих сборок).

В реакторе МИР. М1 проведены испытания ТВС размером 75×80 мм в канале с внешним диаметром 120 мм. В конструкции реактора предусмотрена возможность увеличения диаметра канала до 148 мм, при этом размеры ТВС могут достигать примерно 100×100 мм. Облучательное устройство состоит из цилиндрического корпуса; концевых деталей для дистанционной загрузки в активную зону и уплотнения в канале реактора; вытеснителей, обеспечивающих прохождение теплоносителя через топливные пластины.



Облучательное устройство для внутриреакторных испытаний мини-пластин состоит из трёх разборных ЭТВС, каждая из которых включает в себя по три мини-пластины. Любую из сборок можно извлечь из облучательного устройства для видеоисследования поверхности мини-пластин, гамма-сканирования и измерения толщины оксидного слоя вихретоковым детектором. При этом мини-пластины остаются в сборке.



В реакторе МИР. М1 испытаны стержневые (U–Mo)-мини-твэлы с целью получения экспериментальных данных по изменению свойств топливного сердечника, материала оболочки и герметичности топливных элементов после достижения различных значений выгорания.

Для испытаний мини-твэлов разработано облучательное устройство для установки в каналы реактора МИР. М1. Разборная конструкция позволяет проводить периодические исследования, а также замену мини-твэлов в облучательном устройстве в условиях радиационно-защитной камеры.

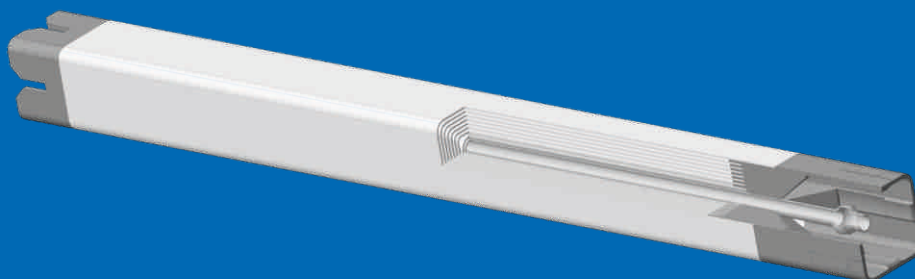
В реакторе МИР. М1 проводятся испытания полномасштабных ЭТВС реактора типа ИРТ различной конструкции.



Внешний вид облучательного устройства с мини-твэлами

В настоящее время ТВС реактора типа ИРТ используются на многих исследовательских реакторах российских разработок: ИР-8, ИРТ-МИФИ, ИРТ-Т (Россия), LVR-15 (Чехия), ВВР-СМ (Узбекистан). Для обеспечения гидродинамических условий испытаний, наиболее приближённых к условиям эксплуатации подобных типов ТВС, разработан и изготовлен канал, состоящий из нескольких частей с различными формами проходных сечений.

Съём тепла с экспериментальной тепловыделяющей сборки осуществляется прямоточным движением теплоносителя первого контура сверху вниз.



Общий вид экспериментальной тепловыделяющей сборки ИРТ-3М

# Типы и характеристики датчиков для оснащения облучательных устройств и ТВЭЛОВ

Большинство экспериментов в реакторе МИР. М1 проводится с измерением:

- температуры топлива и оболочки;
- давления газов под оболочкой;
- деформации твэла (длины топливного сердечника и оболочки, диаметра твэла);
- динамики изменения плотности потока нейтронов.

В процессе испытаний датчики, которые изготавливаются в подразделении реакторного исследовательского комплекса НИИАРа, продемонстрировали хорошие технические характеристики, высокую работоспособность и допустимые погрешности измерений.



Параметр	Значение	Погрешность, %	Характеристика датчика		
			Тип датчика	Диаметр, мм	Длина, мм
Температура, °C:					
теплоносителя, оболочки	До 1 100	0,75	Термопара кабельная ХА	0,5–3	До 10 000
топлива	То же	То же	Термозонд кабельный ХА	То же	То же
	До 2 300	Примерно 1,5	Термозонд ВР 5/20, (Мо+ВеО)-чехол	1,2–2	До 500
Давление газов в компенсационном объеме твэла, МПа	0–20	Специальная градуировка	Сильфон + ДТП	9–16	80
Удлинение, мм:					
оболочки	0–10	То же	ДТП	То же	То же
топливного сердечника	То же	»	То же	»	»
Плотность нейтронного потока, см <sup>-2</sup> · с <sup>-1</sup>	10 <sup>11</sup> –10 <sup>15</sup>	Примерно 1	ДПЗ родиевый, гафниевый	2–4	50–100

Примечание. ДТП — дифференциально-трансформаторный преобразователь; ДПЗ — детектор прямого заряда.

# Водно-химические режимы при проведении реакторных экспериментов

Испытания твэлов, ТВС и конструкционных материалов в петлевых установках реактора МИР. М1 проводятся в водно-химических режимах с моделированием условий, характерных для различных ядерных реакторов.

## Моделируются водно-химические режимы:

- аммиачный;
- аммиачно-борно-калиевый — реакторов ВВЭР;
- борно-литиевый с дозированием газообразного водорода — реакторов PWR.

## Для возможности поддержания концентрации реагентов в заданном диапазоне в составе петлевой установки предусмотрены системы:

- постоянно действующих ионообменных фильтров с ионитами ядерного класса в соответствующей форме;
- подпитки, состоящей из электрообогреваемого бака для приготовления концентрированного раствора борной кислоты;
- ввода химических реагентов с линиями подачи газообразного водорода и непрерывного дозирования микрокомпонентов.

Методическая база химического контроля включает в себя как традиционные методики (фотометрию, рН-метрию, кондуктометрию), так и современные компьютеризированные комплексы



Ионный хроматограф для контроля анионных примесей



Автоматизированные анализаторы газов с высокопараметрическими датчиками и современный компьютеризированный хроматограф для определения газов



Атомно-абсорбционный спектрометр для определения катионных примесей

# Сотрудники

В настоящее время безопасное функционирование реакторной установки МИР. М1 обеспечивается сменным персоналом; технологическим управлением; группами транспортной технологии и учёта ядерных материалов; управлениями: механиков, электриков, информационно-вычислительной техники и СУЗ, радиационной безопасности; лабораторией петлевых испытаний







**Программа дальнейшего расширения экспериментальных возможностей реактора МИР. М1 и развития перспективных направлений исследований предполагает следующие мероприятия:**

- совершенствование методик контроля параметров и внутриреакторных измерений характеристик ТВЭЛОВ;
- проведение комплекса испытаний по обоснованию модернизированных и новых типов топлива реакторов ВВЭР и PWR в различных проектных условиях;
- использование петлевых установок с газовым теплоносителем и проведение исследований элементов активной зоны и макетов ТВС высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов;
- реакторные испытания по усовершенствованию и обоснованию топлива новых активных зон плавучих энергоблоков, атомных станций малой мощности и атомных ледоколов нового поколения;
- разработку проекта универсальной петлевой установки, обеспечивающей моделирование условий эксплуатации водоохлаждаемых реакторов перспективных ядерных энергетических установок и модернизацию петлевых установок первой очереди;
- расширение объёма и номенклатуры нарабатываемой изотопной продукции;
- усовершенствование экспериментальных устройств;
- продление срока эксплуатации реактора МИР. М1 и его технологических систем, включая модернизацию и замену бериллиевых блоков

# КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ



## **ИЖУТОВ**

Алексей Леонидович

Заместитель директора —  
научный руководитель  
Тел.: 8 (84-235) 6-58-64, 6-55-47  
E-mail: izhutov@niiar.ru



## **ПЕТЕЛИН**

Алексей Леонидович

Начальник реакторного  
исследовательского комплекса  
Тел.: 8 (84-235) 6-58-27  
E-mail: pal@niiar.ru



## **РОМАНОВСКИЙ**

Сергей Владимирович

Главный инженер — начальник  
департамента исследовательских  
реакторов  
Тел.: 8 (84-235) 6-56-85



## **СВИСТУНОВ**

Владимир Анатольевич

Главный инженер реакторных  
установок МИР. М1, РБТ-10/2  
Тел.: 8 (84-235) 6-55-51

**Мы всегда рады предоставить дополнительную  
информацию о деятельности АО «ГНЦ НИИАР»**

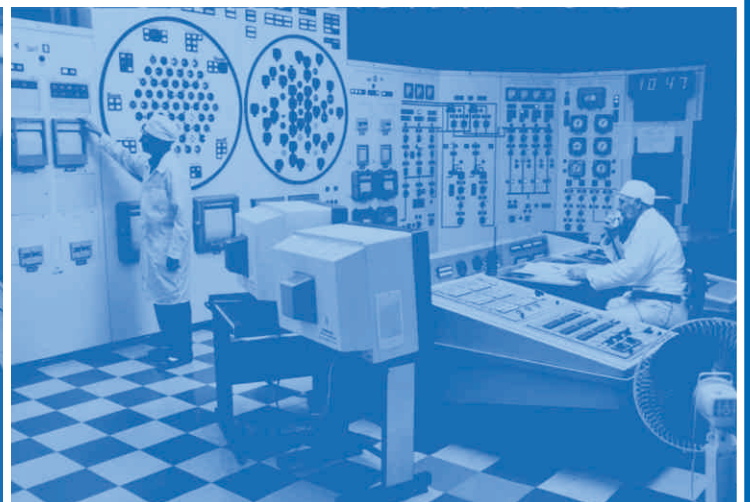
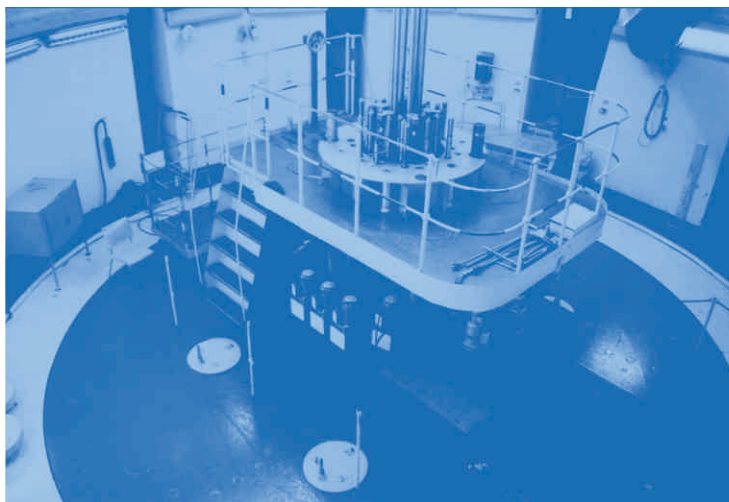
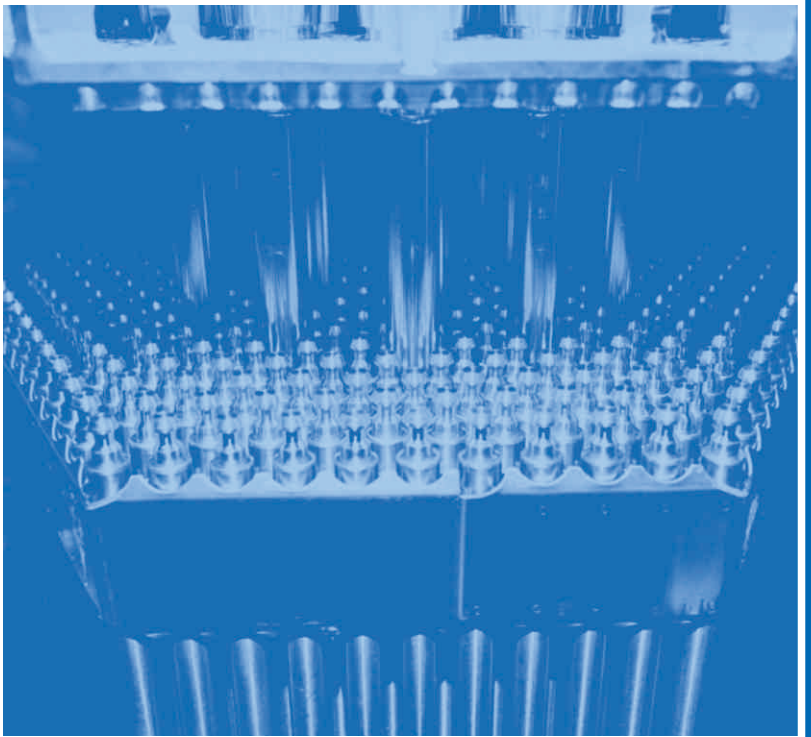
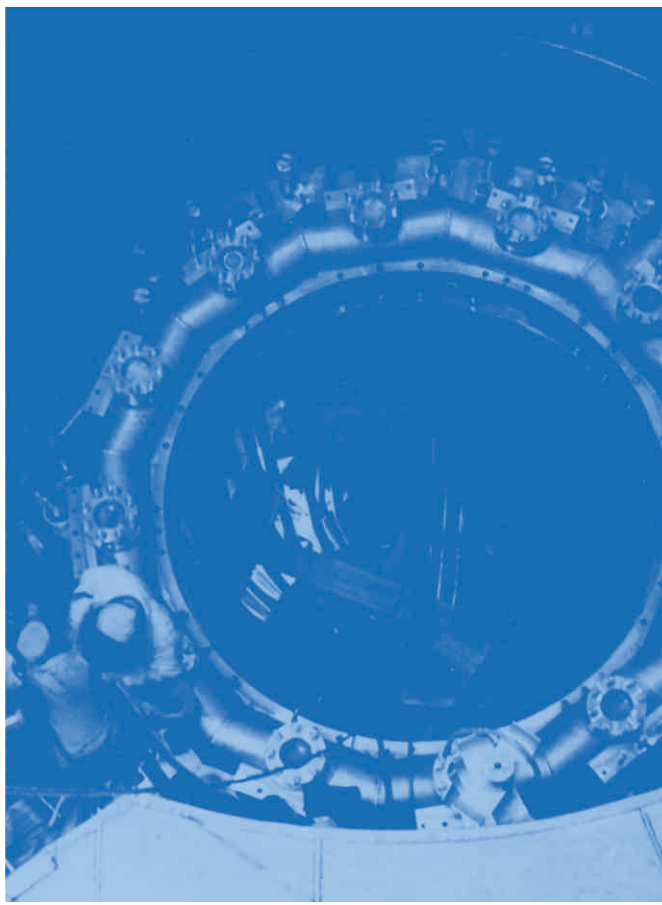
Управление коммуникаций

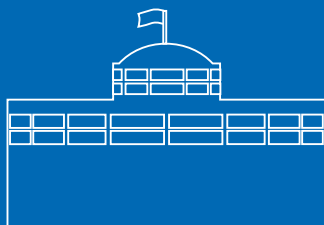
- Тел.: +7 (84-235) 6-56-42,  
+7 (84-235) 6-53-55

- E-mail: [press@niiar.ru](mailto:press@niiar.ru)









### Рекламное издание

Ответственный за подготовку издания А.Л. Ижатов

Редактор Т.А. Максимова

Компьютерная вёрстка и дизайн издания М.Н. Мурзиной

Подписано в печать. Формат 60×84/8

Уч.-изд. л. 2,36. Усл. печ. л. 2,82. Печать полноцветная. Бумага мелованная

Гарнитура Bebas neue Bold, Myriad Pro Cond, Myriad Pro

Оригинал-макет подготовлен специалистами

управления коммуникаций АО «ГНЦ НИИАР»

433510, Ульяновская область, г. Димитровград, Западное шоссе, 9

Отпечатано в ОАО «Областная типография "Печатный двор"»,

432049, г. Ульяновск, ул. Пушкарева, 27

ISBN 978-5-94831-157-9



9 785948 311579