

ПРОЕКТ РЕАКТОРА СФИНКС
ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Адамов Е.О.	-НИКИЭТ г.Москва
Артабкин В.Н.	-НИКИЭТ
Бовин А.П.	-НИКИЭТ
Булкин Ю.М.	-НИКИЭТ
Карташев Е.Ф.	-НИКИЭТ
Корнеев А.А.	-НИКИЭТ
Стенбок И.А.	-НИКИЭТ
Терехов А.С.	-НИКИЭТ
Хмельщиков В.В.	-НИКИЭТ
Черкашов Ю.М.	-НИКИЭТ

89-12339 (5359e/0558e)
Translated from Russian

IAEA-SM-310/91P

THE SPHINX REACTOR FOR ENGINEERING TESTS

E.O. Adamov, V.N. Artamkin, A.P. Bovin, Yu.M. Bulkin,
E.F. Kartashev, A.A. Korneev, I.A. Stenbok,
A.S. Terekhov, V.V. Khmel'shchikov,
Yu.M. Cherkashov

Scientific Research and Design Institute
for Power Technology, Moscow
USSR

ABSTRACT

A research reactor known as SPHINX is under development in the USSR. The reactor will be used mainly to carry out tests on mock-up power reactor fuel assemblies under parameters close to normal parameters in experimental loop channels installed in the core and reflector of the reactor, as well as to test samples of structural materials in ampoule and loop channels. The SPHINX reactor is a channel-type reactor with light-water coolant and moderator. The maximum achievable neutron flux density in the experimental channels (cell composition 50% Fe, 50% H₂O) is 1.1×10^{15} neutrons/cm² · s for fast neutrons ($E > 0.1$ MeV) and 1.7×10^{15} for thermal neutrons at a reactor power of 200 MW. The design concepts used represent a further development of the technical features which have met with approval in the MR and MIR channel-type engineering test reactors currently in use in the USSR. The "in-pond channel" construction makes the facility flexible and eases the carrying out of experimental work while keeping discharges of radioactivity into the environment to a low level. The reactor and all associated buildings and constructions conform to modern radiation safety and environmental protection requirements.

ПРОЕКТ РЕАКТОРА СФИНКС ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

В СССР ведется разработка проекта исследовательского реактора СФИНКС. Основные направления использования реактора – проведение испытаний макетных ТВС энергетических реакторов с обеспечением параметров, близких к натурным, в экспериментальных петлевых каналах, установленных в активной зоне и отражателе реактора, а также испытания образцов конструкционных материалов в ампульных и петлевых каналах.

Реактор СФИНКС относится к классу канальных реакторов, теплоносителем и замедлителем в нем служит легкая вода. Максимальная плотность нейтронных потоков, достигаемая в экспериментальных каналах (состав ячейки 50 % Fe, 50 % H₂O) до $1,1 \cdot 10^{15}$ нейтр./см²·с по быстрым нейтронам ($E > 0,1$ МэВ) и до $1,7 \cdot 10^{15}$ по тепловым нейтронам при мощности реактора 200 МВт.

Заложенные в проекте реактора концепции являются дальнейшим развитием технических решений, которые апробированы в действующих в СССР канальных реакторах для инженерных испытаний МР и МИР.

Устройство реактора по типу "каналы в бассейне" обеспечивает гибкость и удобство проведения экспериментальных работ и низкие выходы активности в окружающую среду.

Реактор, а также связанные с его эксплуатацией здания и сооружения выполняются с учетом современных требований по обеспечению безопасности и защиты окружающей среды.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы отмечается нарастание разрыва между потребностями в проведении материаловедческих экспериментальных работ и петлевых испытаний, связанных с разработкой топлива для энергетических ЯР, и возможностями, которые представляют действующие в СССР реакторы для материаловедческих и петлевых испытаний (МР, МИР, СМ-2).

Это явилось основным фактором, определяющим необходимость разработки исследовательского реактора СФИНКС.

Принято, что главными направлениями использования реактора будут проведение испытаний в экспериментальных петлевых каналах макетных ТВС энергетических реакторов с обеспечением параметров, близких к натурным, а также испытания образцов конструкционных материалов в ампульных и петлевых каналах в условиях высоких нейтронных потоков. В то же время характеристики реактора и его конструкция дают возможность проведения на нем широкого круга экспериментальных и прикладных работ – производство радиоактивных изотопов, нейтронная радиография топливных элементов и сборок, нейтронно-активационный анализ, физические эксперименты на выведенных нейтронных пучках и т.п.

І. ФИЗИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ РЕАКТОРА

По своему основному конструктивному решению реактор выполняется как многопетлевая установка, обеспечивающая одновременное ведение нескольких разнохарактерных экспериментов.

Исходя из условий удобства и безопасности работы реактора с петлевыми каналами, которые могут содержать теплоноситель высоких параметров, было принято решение активной зоны в канальном исполнении, при котором тепловыделяющие сборки (ТВС) размещаются в отдельных каналах, охлаждаемых водой под давлением.

Для обеспечения в экспериментальных устройствах реактора, размещаемых в активной зоне и отражателе, требуемых условий облучения, а также с целью достижения максимальной широты и разнообразия экспериментальных возможностей, в конструкции реактора реализуются следующие принципы:

- высокая удельная мощность, снимаемая с ТВС, за счет развитой поверхности теплообмена, охлаждения ТВС холодной водой под давлением, высокой скорости теплоносителя в активной зоне;
- возможность размещения экспериментальных каналов различного размера в любых ячейках решетки активной зоны, причем каждый экспериментальный канал окружен по крайней мере одним полным рядом рабочих каналов;
- снижение количества замедляющих нейтроны сред в активной зоне реактора за счет плотной упаковки рабочих каналов и установки в полости в "узлах" решетки между рабочими каналами алюминиевых вытеснителей;
- размещение в активной зоне распределенной системы устройств воздействия на локальные размножающие свойства (двухпозиционных поглощающих стержней вокруг каждого облучательного устройства и внутри любой ТВС);
- организация в отражателе двух рядов облучательных объемов различного диаметра.

В качестве ТВС, применяется конструкция из концентрических трубчатых тепловыделяющих элементов, аналогичная ТВС реакторов МИР [1] и МР [2], но с более развитой поверхностью теплообмена.

Размещение рабочих каналов в виде скрученного пучка (аналогично примененному в реакторе ВР-2 [3]) обеспечивает близкую к максимально возможной для канальных реакторов плотность активной зоны и, одновременно, необходимую свободу в установке экспериментальных устройств и обслуживании оборудования реактора.

Принятая высота активной зоны реактора (800 мм) позволяет проводить достаточно корректное исследование длинномерных объектов облучения. При необходимости, для проведения специфических экспериментов, высота активной зоны реактора путем замены ТВС может быть увеличена до 1000 мм.

2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕАКТОРА

Реактор, включая активную зону, отражатель, систему подвода и отвода воды I контура, вертикальные экспериментальные каналы, размещен в бассейне с водой, который выполнен в бетонном массиве здания (рис.1,2).

Бассейн реактора и находящийся над ним реакторный зал окружены защитной герметичной оболочкой (контейнментом), который снабжен по тракту транспортировки облученных изделий шлюзовой камерой, обеспечивающей герметичность по воде. Ниже отметки реакторного зала контейнмент переходит в массив здания реактора, обеспечивающий необходимую прочность и герметичность.

Бассейн реактора соединен с заполненным водой транспортным коридором, который является начальным участком тракта в здании

реактора для транспортировки отработанных ТВС, петлевых каналов и других облученных изделий на хранение, разделку и исследование.

Проем поворотного круга служит для обеспечения доступа к головкам экспериментальных каналов и проведения всех работ по обслуживанию реактора из реакторного зала.

Во время работы реактора проем поворотного круга и транспортный коридор закрыты стальными съемными защитными плитами.

В шахте бассейна под уровнем воды расположены камеры разъемов экспериментальных петлевых каналов, в которых размещены места соединения (разъемные или сварные) трубопроводов петлевых каналов со стационарными трубопроводами контуров экспериментальных петлевых установок.

Тепловыделяющие сборки (ТВС) представляют собой систему коаксиальных трубчатых твэлов, объединенных концевыми деталями. Каждый твэл представляет собой трубу, состоящую из топливного слоя, внешнего и внутреннего герметизирующего покрытия из алюминиевого сплава. Суммарная толщина наружного твэла - 1,5 мм, остальных - 1,25 мм. Минимальная толщина оболочки составляет соответственно 0,4 и 0,3 мм. В качестве материала топливного сердечника используется металлокерамическая топливная композиция ($UO_2 + Al$). Обогащение топлива по урану-235 - 90 %. Высота активной части ТВС 800 мм.

Для реактора разработаны ТВС двух типов: с десятью и с семью твэлами. ТВС первого типа имеют центральную полость, в которую может быть установлен вытеснитель диаметром 12,5 мм или стержень с выгорающим поглотителем. Содержание урана-235 в такой ТВС - 536 г. ТВС второго типа имеют центральную полость для установки экспериментального устройства диаметром 30 мм.

В качестве теплоносителя I контура используется вода с давлением на входе в активную зону 2,0 МПа (20 кгс/см^2). Охлаждение ТВС осуществляется прямоточным движением теплоносителя сверху вниз. Температура воды на входе 45°C , на выходе 90°C , скорость на твэлах около 10 м/с.

Рабочие каналы в центральном сечении активной зоны размещаются по треугольной сетке с шагом 80 мм.

Для обеспечения в экспериментальных устройствах, размещенных в активной зоне, высокой плотности потока быстрых нейтронов замедляющая среда (вода) из пространства между рабочими и экспериментальными каналами в пределах активной зоны максимально удалена вытеснителями, изготовленными из слабопоглощающих материалов (бериллия и алюминиевых сплавов).

Рабочий канал состоит из трубы, выполненной из циркониевого сплава, с наружным диаметром 78 мм и толщиной стенки 1,5 мм, головки и хвостовика. Внутри канала завальцовано кольцо, служащее опорой для ТВС. Головка предназначена для центрирования, опоры и фиксации рабочего канала в расточках подводящего коллектора, хвостовиком рабочий канал центрируется в стояке отводящего коллектора.

Отверстия в верхней плите подводящего коллектора для установки рабочих каналов и ТВС закрыты съемными пробками.

Герметизация I контура обеспечивается кольцевыми резиновыми уплотнениями, установленными на пробках подводящего коллектора и на головках и хвостовиках рабочих каналов.

Конструкция подводящего коллектора обеспечивает установку в активную зону реактора широкого набора экспериментальных каналов (фильдовского типа) по диаметрам: в центральную ячейку – диаметром до 240 мм; в шесть периферийных ячеек – до 128 мм, или одновременную

установку до 19 экспериментальных каналов наружным диаметром 78 мм. При этом каждый экспериментальный канал окружен полным рядом ТВС. Необходимое пространство в активной зоне для установки экспериментальных каналов различного диаметра обеспечивается извлечением одного или группы рабочих каналов, при этом отверстия в нижней плите коллектора, образовавшиеся при извлечении группы рабочих каналов, закрываются специальными заглушками.

Предусмотрена возможность установки в периферийные ячейки активной зоны до шести прямоточных U -образных экспериментальных каналов. В этом случае для вывода горизонтального участка отводящего трубопровода прямоточного канала один из рабочих каналов, окружающих каждый U -образный канал, заменяется на вытеснитель.

Отводящий коллектор выполнен общим для всех рабочих каналов, однако наличие в коллекторе отдельных стояков (причем каждый стояк снабжен соплом и импульсными трубками для контроля расхода через рабочий канал, а также имеет отборы для отвода теплоносителя) позволяет обеспечить индивидуальный контроль расхода, температуры теплоносителя и контроль герметичности ТВС в каждом канале.

Расположение рабочих каналов в реакторе в форме "скрученного" пучка характеризуется следующими данными: минимальный шаг между каналами выполнен в центральной плоскости активной зоны и равен 80 мм (при наружном диаметре канала 78 мм); шаг в районе подводящего коллектора - 200 мм. При этом на верхнем и нижнем торцах активной зоны, на расстоянии 400 мм от ее центра, шаг между осями каналов составляет 81,7 мм.

Для выбранного пучка максимальный угол наклона рабочих каналов к вертикалы составляет 11° , а для сменных блоков бериллиевого отражателя он равен 14° .

Рабочие органы системы управления и защиты (СУЗ) реактора размещаются в каналах СУЗ, устанавливаемых в рабочие каналы вместо ТВС. Рабочий орган СУЗ (РО СУЗ) состоит из двух частей – поглотителя и вытеснителя. Поглотитель представляет собой сборку в виде "беличьего колеса" из стержней диаметром 4,5 мм, содержащих карбид бора, материал покрытия – коррозионностойкая сталь толщиной 0,3 мм. Материал вытеснителя – алюминиевый сплав.

Для перемещения РО СУЗ используются индивидуальные шаговые электромагнитные приводы, которые устанавливаются на подводящем коллекторе реактора. Конструкция узла крепления привода СУЗ обеспечивает установку РО СУЗ с приводом в любую ячейку активной зоны

Общее количество исполнительных органов СУЗ – до 25, из них до 21 – компенсирующих, три – аварийной защиты, один – автоматический регулятор.

В качестве дополнительных средств компенсации в реакторе предусмотрено использование двухпозиционных регуляторов, устанавливаемых внутрь ТВС в любом рабочем канале, а также поглотителей, которые могут устанавливаться в пространство между рабочими каналами, вместо вытеснителей из алюминиевого сплава, или в вытеснители экспериментальных каналов.

Двухпозиционный регулятор в рабочем канале состоит из поглощающего стержня, устройства для перемещения стержня и головки. Головка двухпозиционного регулятора по типу уплотнения и крепления на подводящем коллекторе реактора аналогична съемной пробке рабочего канала. Перемещение стержней двухпозиционных регуляторов осуществляется дистанционно с помощью специального инструмента по мере выгорания активной зоны. Частота проведения этих операций – до 2 раз в сутки.

Детекторы СУЗ располагаются в воде за пределами обечайки отражателя напротив активной зоны и практически равномерно охватывают активную зону.

Активная зона реактора окружена боковым отражателем, состоящим из сменных бериллиевых и стационарных бериллиевых и графитовых блоков. Графит очехлован алюминием толщиной 4 мм. В блоках отражателя имеются ячейки для установки экспериментальных устройств с наружными диаметрами от 78 мм до 200 мм.

Для выведения нейтронных пучков реактор оснащен тремя горизонтальными каналами (ГЭК) – одним тангенциальным и двумя радиальными. Плотность потока тепловых нейтронов в отражателе в районе расположения ГЭК до $9 \cdot 10^{14}$ $1/\text{см}^2 \cdot \text{с}$.

Охлаждение блоков отражателя, а также вытеснителей и поглотителей в межканальном пространстве активной зоны осуществляется водой бассейна, которая прокачивается через зазоры в полость под отражателем и по двум отводящим трубопроводам направляется в помещение контура бассейна реактора.

Заложенные в проекте реактора СФИНКС концепции в максимальной степени основаны на технических решениях, апробированных в ходе длительной эксплуатации действующих в СССР канальных реакторов для инженерных испытаний МР и МЭР и в необходимой мере являются их развитием с учетом повышения эффективности и безопасности эксплуатации реактора.

3. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРА

Таблица I

Основные характеристики реактора

Параметр	Значение
Тип реактора	Канальный в бассейне
Режим работы	Стационарный, маневренный
Максимальная тепловая мощность, МВт	200
Топливо	$UO_2 + Al$
Обогащение по урану-235, %	90
Тип твэла	Трубчатый
Загрузка урана-235, кг	22,5
Замедлитель и теплоноситель	Дистиллированная вода
Отражатель	Be + графит
Высота активной зоны, м	0,8
Количество ТВС	до 45
Максимальная плотность потока тепловых нейтронов в активной зоне, $1/cm^2 \cdot c$	$1,7 \cdot 10^{15}$
Максимальная плотность потока быстрых нейтронов ($E > 0,1$ МэВ) в активной зоне, $1/cm^2 \cdot c$	$1,1 \cdot 10^{15}$
Продолжительность кампании, эфф.сут	25
Среднее выгорание топлива в выгружаемых ТВС, %	40
Количество рабочих органов СУЗ	до 25

Продолжение табл. I

Параметр	Значение
в том числе:	
AP	I
КС	до 2I
АЗ	3
Количество ионизационных камер	9
Параметры контура охлаждения активной зоны:	
давление теплоносителя в подводящем коллекторе, МПа	2,0
максимальный расход теплоносителя через активную зону, м ³ /ч	3600
скорость охлаждающей воды на твэлах, м/с	10
температура теплоносителя на входе в ТВС, °С	45
температура теплоносителя на выходе из ТВС, °С	90
Параметры контура охлаждения отражателя:	
расход теплоносителя, м ³ /ч	1500
температура теплоносителя на входе в отражатель, °С	40
температура теплоносителя на выходе из отражателя, °С	50

4. ОСОБЕННОСТИ ФИЗИЧЕСКОГО И КОНСТРУКТИВНОГО УСТРОЙСТВА РЕАКТОРА, НАПРАВЛЕННЫЕ НА ПОВЫШЕНИЕ ЕГО БЕЗОПАСНОСТИ

Выбор конструктивной схемы реактора с погружением активной зоны и коммуникаций I контура в бассейн с водой определен вопросами обеспечения безопасности реактора при нормальной эксплуатации и в аварийных ситуациях.

Бассейн реактора со значительными запасами воды является не только средством радиационной защиты при перегрузках, но также эффективным теплоприемником и источником воды для охлаждения активной зоны в аварийных ситуациях.

Для обеспечения локализации радиоактивных продуктов деления в случае возникновения аварийной ситуации бассейн реактора и реакторный зал окружены защитной герметичной оболочкой.

Бассейн не имеет нижних выводов и окружен массивной бетонной стеной, в связи с чем обеспечено охлаждение активной зоны водой в большинстве аварийных ситуаций.

Течь через горизонтальные каналы не представляет опасности для охлаждения активной зоны, в связи с наличием отдельного герметичного контура охлаждения ТЭС. Кроме того, предусмотрена система сбора и возврата протечек в бассейн.

Крепление подводящего коллектора рассчитано на вертикальное усилие, обусловленное тем, что рабочие каналы в месте своего уплотнения не воспринимают осевых усилий от рабочего давления. Такая конструкция исключает возникновение дополнительных усилий на подводящий коллектор в случае разрушения рабочих каналов.

Подводящие трубопроводы на входе в коллектор имеют обратные клапаны, предотвращающие потерю теплоносителя I контура в случае разрыва подводящего трубопровода.

I контур реактора имеет систему аварийного охлаждения активной зоны, включающую аварийные емкости с запасом воды, насосы аварийной циркуляции и насосы возврата протечек в контур.

Конструкция активной зоны и отражателя исключает непредусмотренные взаимные перемещения элементов, влияющих на реактивность (рабочих каналов с ТВС, блоков бериллиевого отражателя, внутризонных вытеснителей, регулирующих и поглощающих стержней) в процессе нормальной эксплуатации.

Кроме того, конструкция рабочих каналов предусматривает фиксацию ТВС в осевом направлении, что исключает массовый подброс ТВС в рабочих каналах при разгерметизации напорного коллектора.

Помимо штатной СУЗ, в реакторе имеется возможность разместить разветвленную систему малогабаритных датчиков внутрореакторного контроля. Эта система, а также индивидуальный контроль температуры и расхода теплоносителя в каждом рабочем канале реактора обеспечивают надежную защиту ТВС от локального перегрева.

Достижению этой же цели поможет наличие физмодели реактора, на которой для каждой новой конфигурации загрузки активной зоны можно предварительно уточнить величину и характер неравномерности энерговыделения в активной зоне реактора.

Задача обеспечения безопасности реактора с учетом работы в нем петлевых каналов с теплоносителями высоких параметров была одним из основных факторов, определивших выбор принципиального конструктивного решения реактора, с выполнением активной зоны из отдельных рабочих каналов. Несущие трубы рабочих каналов обеспечивают достаточно надежную защиту ТВС реактора при многих аварийных ситуациях с петлевыми каналами.

В то же время, ряд мероприятий по обеспечению безопасности реактора будет принят при разработке петлевых каналов и петлевых контуров. Так, петлевые каналы предполагается оснастить защитными кожухами и трактами сброса, что позволит предотвратить неблагоприятные воздействия аварий в петлевых каналах на безопасность реакторной установки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Directory of Nuclear Reactors. Vol.10. p.351. IAEA. Vienna. 1976
- [2] Directory of Nuclear Reactors. Vol.8. p.29. IAEA. Vienna. 1970
- [3] Directory of Nuclear Reactors. Vol.2. p.131. IAEA. Vienna. 1959

1096
КОМПОНОВКА РЕАКТОРА В БАССЕЙНЕ

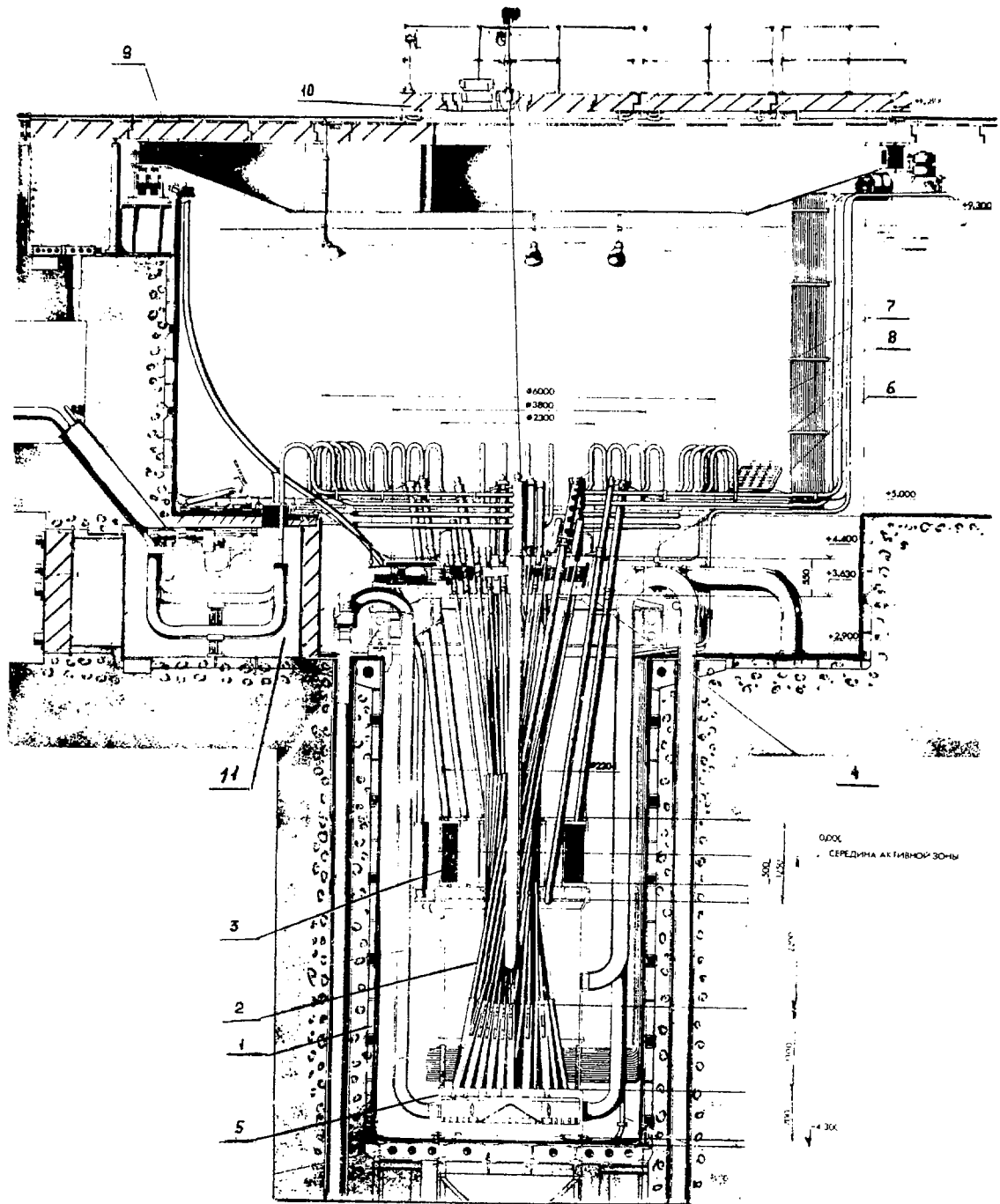


РИС. I

I - Вак бассейна реактора, 2 - Канал рабочий, 3 - Отражатель, 4 - Коллектор подводящий, 5 - Коллектор отводящий, 6 - Исполнительный механизм СУЗ, 7 - Канал экспериментальный петлевой, 8 - Канал экспериментальный, 9 - Круг поворотный, 10 - Плита откатная, 11 - Камера петлевых разъемов.

РАЗРЕЗ ПО ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ КАНАЛАМ

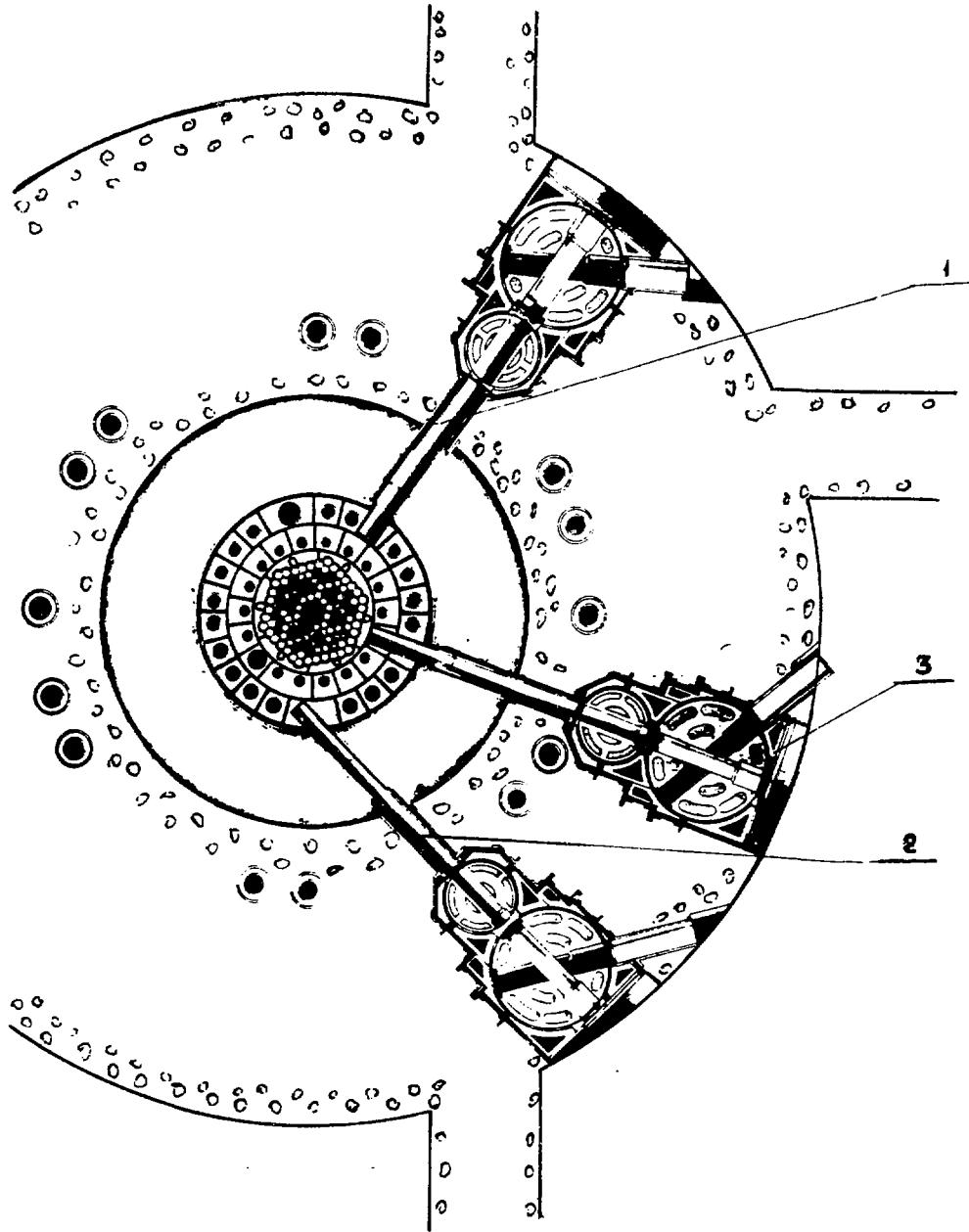


РИС. 2

- 1 - Канал горизонтальный радиальный,
- 2 - Канал горизонтальный тангенциальный,
- 3 - Шибер.