

К ИСТОРИИ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ ТИПА ЭБР

С. А. Андреев, А. В. Лукин, Ю. А. Соколов

РФЯЦ-ВНИИТФ, 456770, г. Снежинск Челябинской обл.

В статье дается краткий обзор истории импульсных ядерных реакторов типа ЭБР.

Ключевые слова: импульсный реактор, активная зона, отражатель.

THE HISTORY OF CREATION AND DEVELOPMENT PULSED NUCLEAR REACTORS OF EBR TYPE / S. A. ANDREEV, A. V. BOCHKOV, A. V. LUKIN, Yu. A. SOKOLOV // The paper gives a brief review of the history of pulsed nuclear reactors of EBR type.

Key words: pulsed reactor, core, reflector.

Направлению импульсных экспериментальных быстрых реакторов с большой центральной полостью (впоследствии получивших название ЭБР) положили начало исследования, выполненные на ФКБН-И. В 1963 году Л. Б. Порецкий, Ю. П. Милованов, В. И. Гневшев и В. Н. Коннов провели усовершенствование ФКБН, дававшее возможность эксплуатировать его в импульсном режиме. Для этой цели АЗ из полусферических деталей с внутренней центральной полостью диаметром 10,7 см была установлена на стальной полусферической конструкции, жестко соединенной с опорным (неподвижным) кольцом стенда. К этой стальной полусфере снизу был прикреплен ствол пневматической пушки, в котором под действием сжатого воздуха можно было перемещать импульсный стержень – медный цилиндр диаметром 7,7 см, длиной 11 см и массой 3,4 кг. Регулируя начальное давление воздуха от 0 до 2 МПа, можно было изменять скорость движения стержня от 0 до 7 м/с. Эта установка была названа ФКБН-И.

Для получения импульсов делений на установке ФКБН-И был выбран наиболее безопасный режим, при котором реактивность непрерывно вводилась в систему при наличии в ней сильного источника нейтронов. Роль нейтронов источника играли запаздывающие нейтроны осколков делений, накопленных при работе на заданном (~1 Вт) уровне мощности (следует отметить, что этот ре-

жим был прообразом режима «с мощности», внедренного на реакторе БАРС-5, что исключило возможность гипотетических аварий взрывного типа с большим энерговыделением). До начала работы с ФКБН-И в импульсном режиме Ю. П. Миловановым были проведены расчеты ожидаемых параметров импульсов делений, в том числе и с учетом запаздывающих нейтронов. Эти расчеты были необходимы, в первую очередь, для оценки температуры урановых деталей АЗ после импульса, так как они не имели антикоррозионных покрытий. В результате расчетов также были получены основные зависимости параметров импульсов делений от скорости ввода реактивности и выявлены основные особенности работы реактора в этом режиме. В частности, было отмечено, что при таком режиме практически исключены гипотетические аварии взрывного типа с большим энерговыделением, а параметры импульсов делений практически нечувствительны к небольшим погрешностям определения вводимой реактивности и реактивности в стартовом состоянии. Было также выяснено, что при одинаковых амплитудах импульсов полное число делений за импульс при непрерывном вводе реактивности примерно в 1,4 раза больше, чем при введении реактивности скачком. Однако для получения импульсов с большой интенсивностью делений (более 10^{20} c^{-1}) требовался ввод реактивности с большой скоро-

стью (более $100\beta_{эф}/с$), достижение которой было невозможно на установке ФКБН-И. Поэтому такие импульсы предпочтительнее было бы получать в режиме скачка реактивности (режим «ожидание»).

Исследование импульсного режима на установке ФКБН-И было начато в декабре 1963 года, первые импульсы делений были получены в январе 1964 года, на несколько месяцев раньше, чем на реакторе БАРС-1. Для максимального импульса полное число делений за импульс было равно $1,5 \cdot 10^{16}$, число делений в быстрой части импульса – $0,35 \cdot 10^{16}$, полуширина импульса – 220 мкс, среднее увеличение температуры АЗ – 52°C . Это были первые в России мощные самогасящиеся импульсы делений, полученные в лабораторных условиях. По американской классификации установку ФКБН-И можно отнести к ИРСД первого поколения, так как детали ее АЗ были изготовлены из высокообогащенного урана-235 и не имели высокотемпературного антикоррозионного покрытия. Поэтому установку ФКБН-И по праву можно назвать первым импульсным реактором самогасящего действия, созданным в России.

Схема импульсного реактора ФКБН-И и осциллограммы первых импульсов делений показаны на рис. 1 и 2.

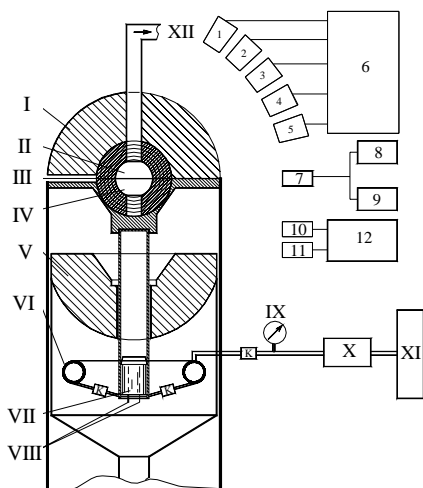


Рис. 1. Схема ФКБН-И: I – верхний неподвижный отражатель нейтронов из меди; II – активная зона из урана; III – термопары; IV – полость $\varnothing 107$ мм для облучаемых образцов и приборов; V – нижний подвижный отражатель нейтронов из меди; VI – ресивер; VII – импульсный стержень из меди; VIII – пневматическая пушка; IX – манометр; X – редуктор; XI – баллон со сжатым азотом; XII – вывод к системе охлаждения; К – пневматические клапаны. Справа от схемы реактора – схема СУЗ: 1–5 – газовые BF_3 счетчики нейтронов; 6 – электронная схема защиты реактора; 7, 10, 11 – ФЭУ; 8, 9 – ФЭК; 12 – быстродействующая защита

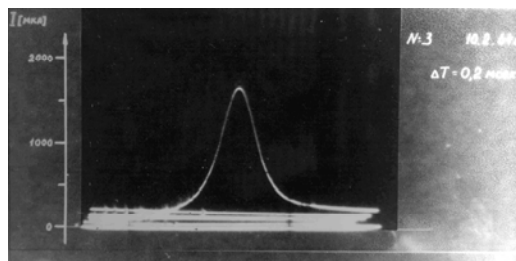
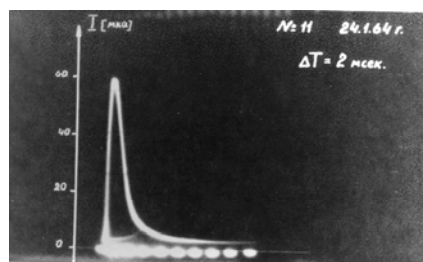


Рис. 2. Осциллограммы первых импульсов делений

Удачный опыт использования установки ФКБН-И для радиационных исследований в статическом и импульсном режимах, накопленный в лаборатории Л. Б. Порецкого (позднее этой лабораторией руководили В. А. Терехин и Ю. А. Соколов), реализовался в развитии направления ИРСД с большими центральными полостями. Начиная с 1963 года был исследован целый ряд критических сборок, состоящих из АЗ с большими центральными полостями и различными отражающими оболочками: ЭБР-107, ЭБР-110, ЭБР-120, ЭБР-135, ЭБР-200 (число указывает на диаметр в миллиметрах центральной сферической или цилиндрической полости). Сферически-симметричная сборка с центральной полостью диаметром 10,7 см и медным отражателем являлась первичной базовой моделью. На основе этой модели был создан и в течение нескольких лет успешно эксплуатировался импульсно-статический реактор ЭБР-107. Замена медного отражателя на отражатель из природного урана позволила увеличить диаметр полости до 12 см и уменьшить массу урана-235 в АЗ. Однако наличие высокого остаточного гамма-фона, обусловленного накоплением осколков делений в отражателе, не способствовало успешной эксплуатации ЭБР-120. Использование отражателя из бериллия привело к увеличению диаметра центральной полости до 13,5 см без увеличения массы высокообогащенного урана. Однако по ряду причин реактор ЭБР с бериллиевым отражателем в импульсном режиме не эксплуатировался.

Обеспечение ядерной безопасности при эксплуатации реакторов с большими центральными полостями имеет свои особенности. Это обусловлено потенциальной опасностью схлопывания по-

лости при аварийном разрушении АЗ, в результате чего система может оставаться надкритической даже при срабатывании аварийной защиты. Однако в специальных экспериментах было показано, что для реакторов типа ЭБР-107 при всех возможных аварийных ситуациях сброс нижней половины отражателя делает систему подкритической.

Как уже указывалось ранее, основными недостатками ЭБР-107 были небольшой диаметр центральной полости, а главное – необходимость проведения сборки-разборки АЗ при каждой новой загрузке-выгрузке облучаемых образцов. Это вызвало необходимость искать другие возможные варианты АЗ с центральной полостью. Сотрудники лаборатории: Л. Б. Порецкий, В. И. Гневшев, В. Н. Коннов, Ю. П. Милованов, Э. П. Магда – в исследованиях рассматривали различные конструкции АЗ, не приводящие к увеличению массы высокообогащенного урана (иначе обеспечение ядерной безопасности работ оказалось бы невозможным).

В 1965 году Л. Б. Порецким была предложена конструкция АЗ, воплощенная затем в реакторе ЭБР-200. В этом реакторе цилиндрическая полость диаметром 20 см и высотой 18 см была образована набором медных колец, к которым сверху и снизу примыкали полусферические сборки из высокообогащенного урана с отражателями из урана естественного состава толщиной 11 см. Регулирование реактивности реактора осуществлялась, как и в ЭБР-107, с помощью стержня точного регулирования (СТР), установленного в верхней части отражателя, а также с помощью перемещения нижней части отражателя.

Для обоснования ядерной безопасности при эксплуатации ЭБР-200, отличавшегося от ЭБР-107 увеличенной массой делящегося материала в АЗ и специфичностью конструкции, Ю. П. Миловановым и В. Н. Конновым были проведены прочностные расчеты всех напряженных деталей АЗ и показана невозможность автокаталитического процесса при потенциально возможных авариях.

Для размещения ЭБР-200 был построен подземный каземат площадью $\sim 25 \text{ м}^2$, заглубленный на 2,5 м. Вход в каземат находился в технологическом зале, где был установлен ФКБН. В 1967 году на реакторе ЭБР-200 были получены первые импульсы делений длительностью $\sim 200 \text{ мкс}$, при этом флюенс нейтронов в центре полости составлял $\sim 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

В 1970 году реактор ЭБР-200 был установлен в новом помещении. В следующем году эта установка была сдана во временную эксплуатацию сроком на три года. В 1973 году реактор ЭБР-200

был снабжен механизмом дистанционной загрузки образцов и запущен в эксплуатацию для работы только в статическом режиме. Конструкция реактора оказалась очень удачной, и он пользовался большим спросом у физиков-экспериментаторов. В его полости объемом $5,5 \text{ дм}^3$ можно было облучать крупногабаритные приборы высоким флюенсом нейтронов при неоднородности потока не хуже $\pm 20 \%$. Высокие параметры импульсов делений, получаемых на реакторах типа ЭБР, объяснялись повышенной эффективностью обратной связи по реактивности при относительно большом времени жизни мгновенных нейтронов в АЗ по сравнению с системами без отражателей. Это связано с более равномерным распределением делений по АЗ, что способствовало повышению эффективности ее внешних слоев и уменьшению массы делящегося материала.

Успешный опыт временной эксплуатации ЭБР-200 послужил основанием для его дальнейшей модернизации (точнее, реконструкции). Материал АЗ заменили на более прочный сплав высокообогащенного урана с массовой долей молибдена 3 %, на все активные детали нанесли антикоррозионное покрытие, высоту полости увеличили до 20 см, отражатель из природного урана заменили на медный. Был изготовлен новый пульт управления и разработана новая система управления и защиты. После модернизации реактор получил название ЭБР-200М и был сдан в эксплуатацию в 1976 году. При полном числе делений в АЗ, равном $1,6 \cdot 10^{17}$, флюенс нейтронов в полости составил примерно $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, полуширина импульса $\sim 50 \text{ мкс}$. С этого времени реактор широко использовался при проведении работ по исследованию радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), особенно крупногабаритных приборов. В модернизации реактора ЭБР-200 принимали участие физики-экспериментаторы: Э. П. Магда, В. А. Крыжановский, Л. В. Семков, В. Ф. Таусенев – и конструкторы: Ф. П. Крупин, А. И. Ушакова, В. А. Мосунов. Руководил работами Л. Б. Порецкий. Схема реактора ЭБР-200М показана на рис. 3.

В начале 1970-х годов по инициативе И. С. Погребова в институте начались работы по созданию двухзонных импульсных реакторов БАРС-4, БАРС-5. К этому времени были известны лишь теоретические работы Р. Эйвери и В. Ф. Колесова и др. по кинетике связанных реакторов. В теоретических работах В. Ф. Колесова и др. были отмечены основные преимущества связанных реакторных систем, а именно: малое отличие полуширины импульса в связанной системе от такой

же величины для однозонного реактора, а также существенно меньшая по сравнению с однозонным реактором неоднородность более высокого флюенса нейтронов в области размещения облучаемых образцов. Однако в известных работах не содержалось практических рекомендаций о том, как управлять связанной системой и какие нейтронно-физические характеристики системы необходимо определять для получения прогнозируемого импульса делений. На эти вопросы не было ответов также и в работах М. И. Кувшинова с сотрудниками (РФЯЦ-ВНИИЭФ), посвященных экспериментальным исследованиям связанной системы, в которой один из компонентов был подкритической сборкой.

По указанной причине для детального исследования особенностей работы связанной реакторной системы в импульсном режиме в 1974 году были спланированы эксперименты на установке ЭБР-200М + РУС. Эта установка состояла из двух примерно равноценных реакторов, каждый из которых мог работать в импульсном режиме. Измерения были проведены в 1978–1979 годах после сдачи связанной системы во временную эксплуатацию. Исследования проводились Э. П. Магдой, В. А. Крыжановским, Л. В. Семковым, В. Ф. Таусневым, И. С. Горшеневым, С. В. Бесовым, В. К. Мокичевым, Г. Н. Кочевым, М. И. Чупруновым. Общее руководство осуществлялось Л. Б. Порецким. Исследования связанной системы ЭБР-200М + РУС были выполнены при различных расстояниях между реакторами, изменявшихся от нуля до 100 см. Реактивность в каждом реакторе изменялась от $+1,1$ до $-5\beta_{эф}$. Выполненные исследования улучшили понимание особенностей переходных нейтронных процессов, происходящих в связанных системах, и позволили определить принципы управления ими в статическом и импульсном режимах работы. Схема экспериментов показана на рис. 4.

Удачная конструкция ЭБР-200М позволила применить его для нового класса работ – исследований по ядерной накачке лазерных сред. Это направление работ возглавил Э. П. Магда. АЗ реактора была реконструирована в 1980–1981 годах, тогда же создан сквозной горизонтальный канал диаметром 12,5 см, проходящий через центральный отражатель, для размещения в нем лазерных кювет – трубчатых лазерных элементов в полиэтиленовом замедлителе.

Реакторно-лазерный комплекс включает в себя кроме реактора и набора лазерных кювет систему создания вакуума, систему приготовления лазерных газовых сред, фильтры для дополни-

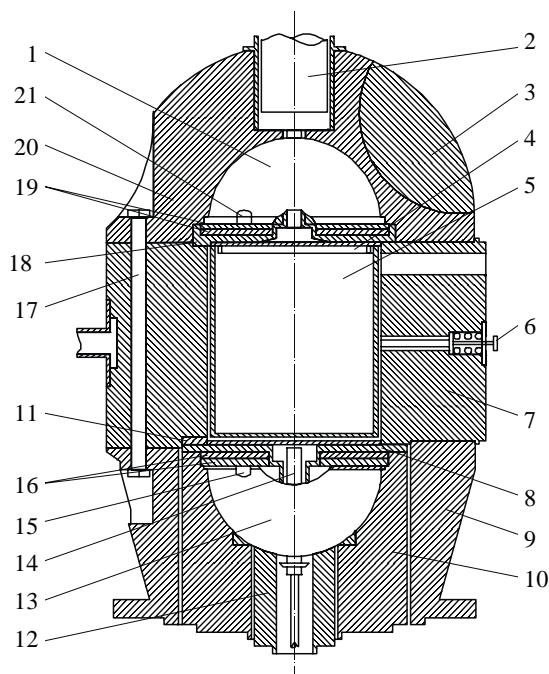


Рис. 3. АЗ реактора ЭБР-200М: 1, 13 – верхние и нижние полусферические оболочки из урана; 2 – СТР; 3 – пробка; 4 – крышка контейнера; 5 – контейнер; 6 – пружинный фиксатор контейнера; 7 – пробка; 8, 11, 18 – стальные диафрагмы; 9 – нижний медный отражатель; 10 – подвижный блок; 12 – стоп-блок; 14 – импульсный стержень; 16, 19 – урановые диски; 20 – верхний отражатель; 15, 21 – отверстия для термопар; 17 – шпилька

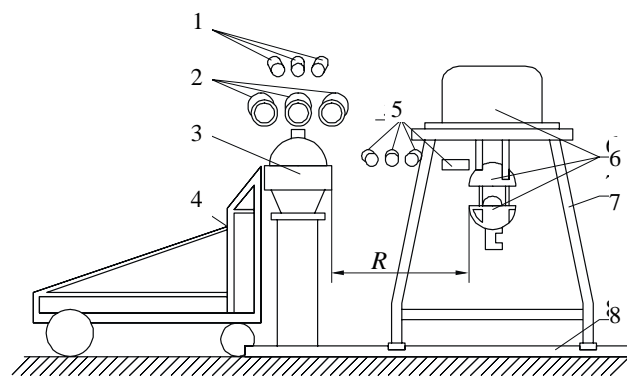


Рис. 4. Схема экспериментов с реакторами ЭБР-200М и РУС: 1 – ФЭК; 2 – нейтронные детекторы; 3 – реактор ЭБР-200М; 4 – тележка механизма загрузки образцов; 5 – измерители периода разгона; 6 – реактор РУС; 7 – тележка; 8 – рельсы

тельной очистки газа, системы вывода светового излучения и регистрации его параметров. Внешний вид реактора ЭБР-Л показан на рис. 5.

Работы по модернизации АЗ реактора велись В. А. Крыжановским, работы по созданию систем вывода лазерного излучения и регистрации его параметров – Л. В. Семковым, системы создания

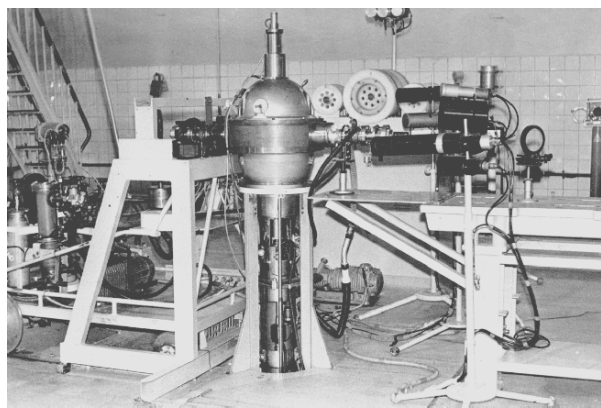


Рис. 5. Импульсный ядерный реактор ЭБР-Л. Сквозь центральный отражатель проходит лазерная кювета. За реактором видны детекторы системы регистрации

вакуума и приготовления газовых лазерных сред – В. Ф. Таусеневым.

В июле 1981 года реактор, получивший название ЭБР-Л, был сдан в эксплуатацию. На реакторе ЭБР-Л были исследованы 10 различных лазерно-активных сред и получена генерация на 21 лазерном переходе. Возбуждение газа производилось осколками делений, которые вылетали из слоя окиси-закиси урана-235, нанесенного на внутреннюю поверхность лазерного элемента.

Для номинального импульса делений в реакторе $1,2 \cdot 10^{17}$ делений с лазерной кюветой внутренним диаметром 2,8 см, наполненной гелием до давления 0,5 МПа, при толщине слоя окиси-закиси урана 90 %-го обогащения, равной $\sim 3 \text{ мг/см}^2$, плотность переданной газу энергии составляет $0,4 \text{ Дж/см}^3$, а мощность накачки – 2 кВт/см^3 . Полное энерговыделение в урановом слое составляет 1 кДж.

Системы создания вакуума, приготовления лазерных газовых сред, вывода светового излучения и регистрации его параметров дорабатывались А. А. Арадушкиным, В. Ф. Дудником, Ф. И. Кривенко, В. М. Мурзиным, Н. Я. Пугачом.

Еще в 1967 году коллективом лаборатории, руководимой Л. Б. Порецким, были проведены работы по изучению прохождения гамма- и нейтронного излучения на большие расстояния (сотни метров) в воздухе как на открытой, так и в лесистой местности, а также работы по определению характеристик противорадиационной защиты крупногабаритных объектов военной техники. Для этой цели реактор ЭБР-107 был вынесен из здания и установлен на вышке на высоте 7 м от поверхности земли. Реактор эксплуатировался в статическом режиме на мощности до 10 кВт без принуди-

тельного охлаждения АЗ. Такой режим работы позволял проводить необходимые измерения на расстоянии до 300 метров от реактора. Для изменения энергетического спектра нейтронов утечки использовались медная или бериллиевая отражающие оболочки.

Примерно в это же время началось создание специального импульсно-статического реактора ПРИЗ (подвесной реактор для исследования защит), способного работать в полевых условиях в интервале температур от -20 до $+40$ °С и на высоте до 100 м. Над проектом этого реактора работали физики-экспериментаторы Ю. П. Милованов, В. Н. Коннов, Э. П. Магда, В. И. Гневшев, конструкторы Ю. М. Кононенко, В. И. Васильев и другие. Основной особенностью реактора ПРИЗ было то, что все механизмы системы управления и защиты располагались над АЗ, а нижняя (подвижная) часть отражателя с установленной на ней АЗ подвешивалась к якорю электромагнита с помощью стальных штоков, проходивших через отверстия в верхней части отражателя. При такой конструкции реактора пространство ниже его АЗ было свободным, что давало возможность достаточно точно определять характеристики гамма- и нейтронного излучений. Реактор можно было эксплуатировать в статическом режиме на мощности до 10 кВт, планировалась также его работа в импульсном режиме с выходом до 10^{16} делений за импульс с полушириной ~ 200 мкс. Для изменения энергетического спектра нейтронов была предусмотрена возможность замены оболочек отражателя нейтронов и установки экранов.

В конце 1960-х годов реактор ПРИЗ был передан на другое предприятие (ЦФТИ МО). Спустя много лет работы, в 2005–2007 годах он был модернизирован. Изменения претерпели АЗ, отражатель, система управления и защиты. Руководил работами начальник отдела ИЯР Н. П. Кураков, в работах принимали участие Ю. А. Соколов, С. С. Бесов, С. В. Бесов, С. Ю. Касьянов и другие. Расчетное сопровождение осуществляли А. В. Лукин, Д. В. Хмельницкий, Л. Ю. Самойлова.

В связи с тем, что реактор ПРИЗ передавался на другое предприятие (ЦФТИ МО), в течение 1967–1969 годов были изготовлены два одинаковых стенда. Первый стенд был частью реактора ПРИЗ, который ввели в эксплуатацию в 1970 году. Второй стенд использовался в качестве основы при разработке реактора РУС, предназначенного для исследований по физике связанных импульсных реакторов. Реактор РУС был изготовлен в виде, допускавшем его эксплуатацию в двух моди-

фикациях: РУС-М и РУС-П. В активной зоне реактора РУС-М использовался медный отражатель нейтронов наружным диаметром 28,3 см и толщиной 5 см, а в АЗ реактора РУС-П использовался отражатель из стальных и полиэтиленовых (в чехлах из кадмия) оболочек примерно такой же толщины. Реактор РУС создавался для работы в составе связанной системы ЭБР-200М + РУС, которая была сдана в эксплуатацию в 1977 году. Реактор РУС был создан группой в составе Э. П. Магды, В. М. Мурзина, А. И. Хабирова и А. И. Козинцева. Реактор РУС мог работать в статическом режиме на мощности до 1 кВт. Кроме того, с помощью реактора РУС (при его работе только совместно с реактором ЭБР-200М) можно было генерировать импульсы делений с полушириной более 100 мкс. Внешний вид реактора РУС-М и схема реактора ПРИЗ показаны на рис. 6 и 7.

В середине 1970-х годов почти в одно время с исследованиями связанной системы ЭБР-200М + РУС снова появилась необходимость проведения работ по определению коэффициентов ослабления нейтронного излучения защитой бронетанковой техники. Для этого по инициативе Л. Б. Порецкого и В. А. Терехина было предложено использовать реактор РУС. Модификация реактора РУС для работы вне помещений была названа РУС-В. В таком виде реактор можно было эксплуатировать с АЗ, окруженной медным или полиэтиленовым отражателем. Была изготовлена вышка высотой примерно 6 м с площадкой размерами 3 × 3 м, защищенной от атмосферных осадков легким алюминиевым укрытием. Был установлен молниеотвод и проложены кабельные линии. Для контроля работы реактора в статическом режиме на мощности до 1 кВт были разработаны и изготовлены соответствующие измерительные каналы. Эти работы выполнялись Л. В. Семковым с участием сотрудников лаборатории.

В заключение можно отметить следующее. За время, прошедшее после получения первого импульса делений, в РФЯЦ-ВНИИТФ был накоплен большой опыт разработки и эксплуатации импульсных ядерных реакторов самогасящего действия. Многолетние исследования на ИРСД позволили получить уникальные результаты. Для одиночных ИРСД с металлическими АЗ из высокообогащенного урана (типа БАРС, ЭБР) реализованы предельные по характеристикам материала параметры импульсов делений.

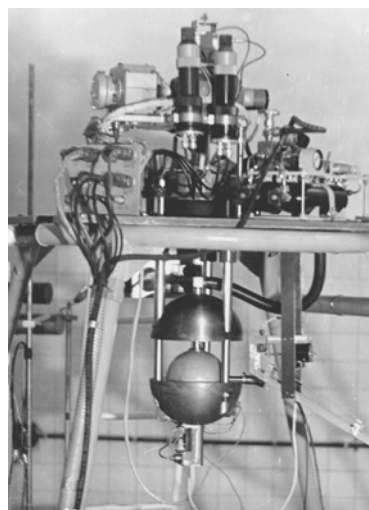


Рис. 6. Импульсный ядерный реактор РУС-М. Механизмы управления реактором расположены над активной зоной

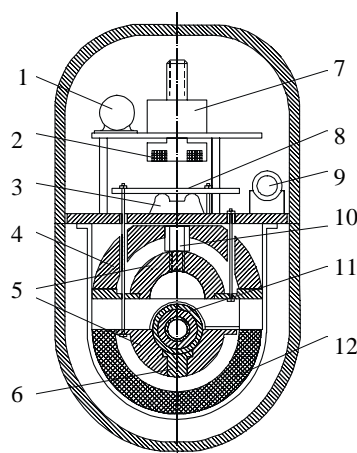


Рис. 7. Схема реактора ПРИЗ: 1 – двигатель; 2 – магнит; 3 – демпфер; 4 – теплозащитный кожух; 5 – отражатель; 6 – никелевая пробка; 7 – редуктор; 8 – якорь; 9 – воздуходувка; 10 – стержень тонкой регулировки; 11 – детали из высокообогащенного урана; 12 – полиэтиленовый конвертор

Список литературы

1. Леваков Б. Г., Лукин А. В., Магда Э. П., Погребов И. С., Снопков А. А., Терехин В. А. Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ / Под ред. А. В. Лукина. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002.

Контактная информация –

Лукин Александр Васильевич,
главный научный сотрудник
НТО-5 РФЯЦ-ВНИИТФ,
тел. (35146) 39773

Статья поступила в редакцию 11.07.2014.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2014, вып. 3, с. 18–23.