

УДК 621.039.573

# Запланированное разрушение реактора с металлической активной зоной: моделирование катастрофических аварий и новые экспериментальные возможности

С. В. Воронцов, М. И. Кувшинов,  
А. Т. Нарожный, В. А. Попов,  
В. П. Соловьев, В. И. Юферев

*Более 30 лет назад во ВНИИЭФ был разработан и испытан реактор с разрушающейся активной зоной, генерирующий импульс с выходом  $\sim 1,5 \cdot 10^{19}$  дел. и шириной на полувысоте  $\sim 2,5$  мкс; создан и отработан расчетно-экспериментальный метод лабораторной калибровки реактора, обеспечивающий высокую точность прогнозирования энерговыделения в реальном опыте при переходах выше мгновенной критичности  $\sim 3 \beta_{эф}$ ; создана транспортабельная защитная камера, обеспечивающая надежную локализацию продуктов взрыва активной зоны малогабаритных ядерных устройств и зарядов ВВ с эквивалентной массой до 100 кг ТНТ.*

*Рассматривается возможное применение реактора в настоящее время.*

## Введение

Разновидностью импульсных ядерных реакторов (ИЯР) являются реакторы аperiодического (самогасящегося) действия, в которых мощные однократные всплески делений инициируются быстрым введением избыточной реактивности, а гасятся за счет отрицательной обратной связи *температура – реактивность* [1, 2].

Основными показателями качества  $K$  аperiодического импульсного реактора (АИР) как источника излучений являются: флюенс нейтронов за импульс  $F$ , длительность импульса  $T_{1/2}$  и объем доступного для экспериментов пространства  $V$ . Считается, что качество реактора тем выше, чем меньше длительность импульса и, естественно, больше флюенс и доступный для облучения объем:  $K \sim F(V/T_{1/2})$  [2]. Как правило, данные показатели взаимосвязаны, и улучшение одного часто достигается за счет понижения других.

Длительность импульса минимальна в компактных АИР на быстрых нейтронах с металлической активной зоной (АЗ) из высокообогащенного  $^{235}\text{U}$ , где время жизни мгновенных нейтронов

очень малó. Однако из-за эффектов «теплого удара» [1, 2] повышать флюенс в таких реакторах можно до определенной величины, зависящей от прочностных характеристик топлива. Если энерговыделение превысит допустимое значение, то возникающие в топливе напряжения могут вызвать деформацию (при достижении предела текучести) и даже разрушение (при превышении предела прочности) деталей АЗ. Примером может служить возникновение трещин в топливных дисках реакторов SPR-II [1], БИР [3] и БР-1 [4]. Для смягчения негативного воздействия теплового удара топливо разбавляют  $^{238}\text{U}$  (реактор Super Kukla), инертным материалом (ТИБР), используют специальное топливо (ИГР, TREAT, БИГР) [2, 5], однако все это ведет к увеличению длительности импульса.

В табл. 1 приведены максимальные значения удельного (на 1 г топлива) энерговыделения в АИР, эксплуатируемых/эксплуатировавшихся во ВНИИЭФ. Первые четыре АИР (БР-К1, БИР-2М, ГИР2, БР-1) представляют собой реакторы с металлической АЗ. Как видно из табл. 1, их максимальное удельное энерговыделение находится в диапазоне ~20–65 Дж/г. (Отметим, что для доведения металлического урана до состояния плавления требуется удельное энерговыделение ~200 Дж/г, а для сублимации ~2000 Дж/г.)

Таблица 1

Удельное энерговыделение при максимальном импульсе в АИР

АИР	Максимальное энерговыделение, МДж	Масса топлива в АЗ, кг	Удельное энерговыделение, Дж/г	Полуширина импульса, мкс
БР-К1	30	1511 (U + 9 % Mo)	~20	1200
БИР-2М	3	121 (U + 6 % Mo)	~25	60
ГИР2	7	178 (U + 9 % Mo)	~39	300
БР-1	11	176 (U + 9 % Mo)	~63	55
БИГР	280	833 (UO <sub>2</sub> + C)	~336	2000
ВИР-2М	80	120 (UO <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O)	~666	2600

Топливо в реакторе БИГР – это специально разработанная однородная смесь диоксида урана с графитом; она позволяет обеспечить генерирование импульсов с рекордным для АИР на быстрых нейтронах энерговыделением [2], поэтому в реакторе БИГР удельное энерговыделение составляет ~340 Дж/г, что в ~5 раз больше, чем в реакторе БР-1. Однако длительность импульса в реакторе БИГР по сравнению с реактором БР-1 увеличилась в ~40 раз.

Максимальное удельное энерговыделение (~670 Дж/г) достигнуто в реакторе ВИР-2М с топливом в виде раствора уранил-сульфата. Однако ВИР – это реактор с разрушающейся активной зоной многократного действия. В каждом импульсе происходит вскипание и разлет топливного раствора внутри герметичного прочного корпуса (т. е. исходная конфигурация АЗ нарушается). После торможения на стенках раствор стекает вниз и принимает прежнюю конфигурацию. Максимальное энерговыделение за импульс в таких реакторах определяется прочностью защитного корпуса [6].

Флюенс нейтронов за импульс в АИР с металлической АЗ можно увеличить (см. табл. 1) как минимум в 3 раза, если допустить плавление материала АЗ, и как минимум в 30 раз, если допустить его испарение. Правда, у такого реактора (в отличие от реактора типа ВИР) АЗ будет одноразовой, поскольку восстановление ее (сбор и переработка делящегося материала) будет представлять собой сложный и длительный процесс.

Если допустить сублимацию топлива в импульсе, то разрушение активной зоны будет носить взрывной характер. Поэтому основной задачей при проведении таких экспериментов является обеспечение надежной защиты персонала и окружающей среды от воздействия ударной волны (УВ) и разлетающихся радиоактивных материалов.

Специалистами ВНИИЭФ были подготовлены и проведены два эксперимента с запланированным разрушением реактора с металлической АЗ. Данный реактор получил название РИР (разрушающийся импульсный реактор) [7].

## 1. Подготовка и проведение экспериментов с РИР

На стадии подготовки экспериментов решались три основные задачи:

- разработка конструкции реактора, обеспечивающей минимальную массу устройства и возможность регулировки реактивности в широких (несколько  $\beta_{эф}$ ) пределах;
- разработка способа калибровки реактивности, позволяющего получить в опыте заданное энерговыделение при переходе в несколько  $\beta_{эф}$  над мгновенной критичностью;
- разработка защитного устройства, локализуящего радиоактивные материалы после взрыва реактора.

### 1.1. Конструкция реактора РИР

Внешний вид и схема первого варианта реактора представлены на рис. 1. Части сферической активной зоны из высокообогащенного урана и отражателя из бериллия собираются и жестко закрепляются на стальном стволе. Внутри ствола размещается цилиндрический импульсный стержень (ИС) из высокообогащенного урана, служащий для перевода системы из глубоко подкритического в надкритическое по мгновенным нейтронам состояние. Перпендикулярно стволу внутри активной зоны располагаются два глухих канала, которые могут быть заполнены небольшими цилиндрическими вкладышами из  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  и Ве. Суммарный запас реактивности при заполнении каналов вкладышами, повторяющими структуру активной зоны, составляет  $4 \beta_{эф}$ . В зависимости от размера и материала вкладыша реактивность системы можно изменять с шагом  $0,1-0,6 \beta_{эф}$ .

Генерация импульса делений в реакторе РИР осуществляется путем быстрого (со скоростью  $\sim 10$  м/с) введения внутрь активной зоны импульсного стержня. Разгон ИС обеспечивается специальным устройством, содержащим в качестве рабочего элемента пороховую навеску.

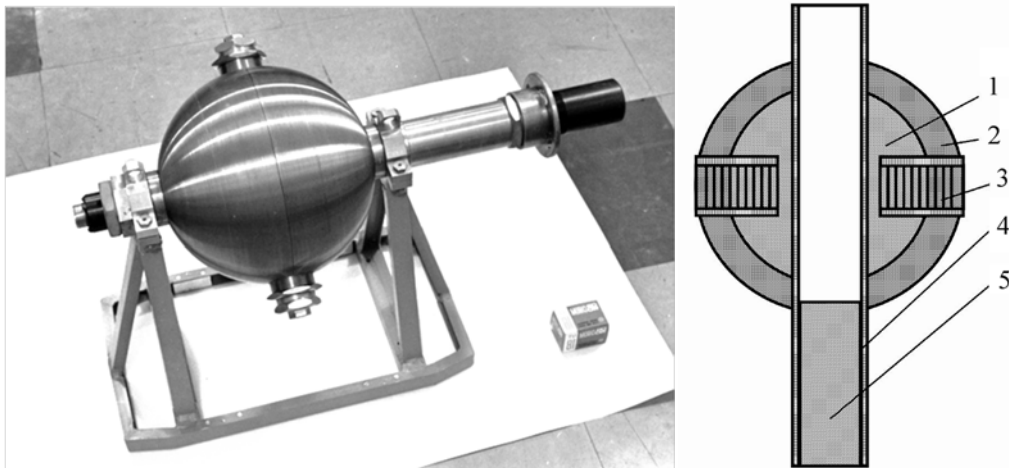


Рис. 1. Внешний вид и схема реактора РИР:

1 – АЗ, 2 – отражатель, 3 – вкладыши для подбора реактивности, 4 – канал ИС, 5 – ИС

В момент достижения максимальной реактивности реактор облучается коротким импульсом нейтронов от внешнего нейтронного генератора (ИНГ), который инициирует цепную реакцию. Для запуска ИНГ в заданный момент времени служит контактор, установленный в стволе и замыкаемый ИС.

Второй вариант реактора принципиально не отличался от первого. Для уменьшения осколочного воздействия из его конструкции были исключены (по возможности) стальные детали, в частности стальной ствол был заменен бериллиевым. Число каналов для регулирования реактивности было увеличено до 6, все они были размещены в отражателе.

Выбранная схема реактора позволяла:

- сохранить жесткий спектр нейтронов и кинетику процесса деления урана, характерную для реактора на быстрых нейтронах, несмотря на наличие эффективного отражателя;
- обеспечить за счет отражателя значительную экономию делящегося материала, расходуемого безвозвратно (в связи с запланированным полным разрушением АЗ);
- значительно уменьшить общую массу АЗ при выбранном энерговыделении.

## ***1.2. Расчетно-экспериментальный способ калибровки реактивности***

При эксплуатации АИР очень многое зависит от умения персонала правильно подобрать стартовую конфигурацию и обеспечить получение импульса с заданными параметрами. Для лабораторных реакторов с металлической АЗ переход выше мгновенной критичности при генерации импульса составляет  $\leq 0,1 \beta_{эф}$ . При подготовке экспериментов с реактором РИР был разработан расчетно-экспериментальный способ калибровки реактивности (подбора стартового состояния), позволяющий получить запланированные параметры импульса при переходе выше мгновенной критичности на  $\sim 3 \beta_{эф}$ .

Особенность кинетики РИР в первую очередь связана с наличием в конструкции замедляющего отражателя из бериллия и заключается в том, что часть нейтронов находится в отражателе достаточно долгое время по сравнению с длительностью импульса мощности. В расчетах отраженные нейтроны представлялись несколькими группами по аналогии с запаздывающими нейтронами. При таком описании обычно возникают трудности, связанные с однозначным выбором числа групп и определением параметров, характеризующих поведение нейтронов каждой группы. Кроме того, в отличие от обычных АИР в РИР необходимо учитывать газодинамические процессы, возникающие при превращении материала АЗ в высокотемпературный пар.

Для расчетов была создана простая аналитическая модель [8], описываемая системой дифференциальных уравнений и включающая два типа параметров: кинетические, характеризующие процесс размножения нейтронов, и газодинамические, характеризующие влияние разлета активной зоны в процессе энерговыделения на реактивность системы. Эти параметры легко корректировались по результатам лабораторных опытов и полигонных испытаний.

В лабораторных условиях с помощью специального калибровочного стенда были исследованы характеристики устройства РИР в подкритическом состоянии и в режиме обычного импульсного реактора. С использованием кинетических параметров, отнормированных по результатам лабораторных экспериментов, были рассчитаны характеристики импульса реактора РИР в режимах, соответствующих разрушению АЗ. С ядерным устройством РИР проведены два полигонных опыта; результаты прогноза хорошо совпали с экспериментальными данными (энерговыделение, длительность импульса, значение  $\lambda$  и другие характеристики устройства). Энерговыделение в опытах составило  $\sim 1,5 \cdot 10^{19}$  делений, а ширина импульса на полувысоте  $\sim 2,5$  мкс.

### 1.3. Устройство для локализации радиоактивных продуктов взрыва

При проведении экспериментов с ядерными устройствами типа РИР одной из основных задач является обеспечение защиты от осколков, УВ и радиоактивных веществ, образующихся при взрывном разрушении АЗ. Для этого применяют специальные локализирующие устройства.

Первый эксперимент с РИР проводился в стационарном стальном защитном сооружении в форме цилиндрической ампулы  $\varnothing 3$  м, длиной 6 м, толщина стенки 20 мм. Ампула имела плоские днища, усиленные ребрами жесткости (рис. 2). На рабочей позиции ампула была засыпана слоем грунта толщиной 1,5 м. Реактор был установлен в центре ампулы, которая перед опытом вакуумировалась до остаточного давления  $\sim 5$  мм рт. ст. Это, во-первых, способствовало созданию благоприятных условий для конденсации паров урана в процессе их разлета, во-вторых, обеспечивало отсутствие избыточного давления после конденсации паров и тем самым исключало утечку радиоактивных веществ в окружающую среду. Механическое воздействие продуктов взрыва (ПВ) на стенки ампулы привело к образованию множественных кратеров и возникновению ряда локальных трещин, однако радиоактивного загрязнения территории не произошло, поскольку все вышедшие ПВ были локализованы в грунтовой засыпке.

Результаты эксперимента позволили начать разработку транспортабельной защитной камеры, макет которой был испытан во втором опыте с реактором РИР (рис. 3). Корпус камеры представлял собой отрезок многослойной (рулонированной) газопроводной трубы с внешним диаметром 1420 мм и толщиной стенки 21,6 мм (4 слоя по 5,6 мм). К трубе были приварены полуэллиптические днища, а в центральном сечении она была усилена двумя обечайками. Длина камеры составляла  $\sim 7$  м, масса – 12,5 т. В результате опыта сплошное днище камеры было разрушено, однако центральное сечение, несмотря на значительную ( $\sim 5\%$ ) деформацию, не имело сквозных трещин. В опыте были уточнены параметры воздействия ПВ реактора на защитную камеру, что позволило откорректировать расчетные программы.

В дальнейшем для изготовления камер применялась технология рулонированных сосудов высокого давления (РСВД) [9]. В специальных взрывных экспериментах с зарядами взрывчатого вещества (ВВ) типа ТГ5/5 были определены предельные (соответствующие образованию сквозной трещины в стенке камеры) деформации и отработаны элементы локальной защиты, значительно снижающие нагрузки в критических областях. Было показано, что камеры данного типа обладают высокой стойкостью к осколочному воздействию продуктов взрыва зарядов ВВ с металлической оболочкой. Для реально созданных конструкций коэффициент запаса по деформации составляет не менее 2 при взрыве заряда ВВ с эквивалентной массой  $\sim 100$  кг ТНТ. Созданная камера (рис. 4) является многофункциональной: кроме экспериментов с реактором типа РИР она может применяться для обезвреживания аварийных ядерных зарядов [10], обеспечения безопасности при проведении взрывных опытов, гидростатических испытаний и т. д.

Проведенные эксперименты с реактором РИР позволили оценить последствия гипотетических аварий на АИР с металлической АЗ и обосновать пределы безопасной эксплуатации реакторов.



Рис. 2. Ампула для опыта РИР-1



Рис. 3. Ампула для опыта РИР-1М



Рис. 4. Многофункциональная камера

## 2. Область применения реактора с разрушающейся активной зоной

Ключевым для любого реактора является обеспечение его безопасной эксплуатации. Особую значимость этот вопрос приобретает для импульсных реакторов с металлической АЗ. Однако последствия возможных аварий (в частности, для американских АИР с металлической АЗ) оцениваются на основе компьютерного моделирования без верификации исходных данных в интересующем диапазоне энерговыделения [11].

Информацию о поведении реактора в аварийной ситуации, необходимую для тестирования расчетных методик, в принципе, можно почерпнуть либо из анализа имевших место аварий, либо из результатов специальных экспериментов. Но при аварии, в силу неожиданности события, регистрация необходимых параметров не производилась. Специальные эксперименты по безопасности реакторов немногочисленны и весьма специфичны (например, BORAX, SPERT, SNAPTRAN-3, KIWI-TNT [2, 12, 13]; результаты этих исследований не могут быть использованы для прогнозирования последствий аварий АИР с металлической АЗ, поскольку в экспериментах участвовали устройства другого типа (легководный замедлитель и топливные пластины в реакторах SPERT и BORAX, стержневая АЗ с большим количеством графита в KIWI-TNT, тройной сплав U-Zr-H и жидкометаллический теплоноситель в опыте SNAPTRAN).

Для получения необходимой информации можно использовать опыты с реактором типа РИР. Анализ имеющейся информации об авариях с исследовательскими реакторами и критическими сборками [13] показывает, что достигнутого в реакторе РИР энерговыделения ( $1,5 \cdot 10^{19}$  дел.) вполне достаточно для моделирования реактивных аварий в АИР, поскольку аварийное энерговыделение во всех описанных случаях не превышало  $\sim 10^{19}$  делений.

В качестве конкретного примера возможного использования реактора РИР можно привести запланированную в США программу экспериментов по импульсному реактору с большим энерговыделением (High-Energy Burst Reactor) [11]. Предполагаются эксперименты с использованием АИР типа GODIVA (т. е. с АИР на быстрых нейтронах с компактной АЗ из высокообогащенного металлического урана), в которых сборка должна доводиться до гидродинамического разрушения с соответствующей диагностикой для определения энерговыделения, начального периода, полуширины импульса, состояния топлива (динамического давления и температуры). Энергетические характеристики предполагаемых опытов приведены в табл. 2. Результаты экспериментов планируется использовать, в частности, для прогноза последствий аварий на американских АИР с металлической АЗ.

Эксперименты программы High-Energy Burst Reactor аналогичны опытам с реактором РИР и могут быть выполнены в лабораторных условиях с использованием взрывозащитной камеры в реакторном каземате. Применение железобетонного защитного сооружения (контейнента), предназначенного для удержания радиоактивных веществ при нарушении герметичности защитной камеры в случае аварийной ситуации, позволяет, в принципе, проводить эксперименты с реактором типа РИР в лабораторных условиях. Контейментом может служить типовой реакторный каземат, который, по оценкам, способен многократно выдержать взрыв мощностью 100 кг в тротиловом эквиваленте.

Таблица 2

Энергетические характеристики планируемых экспериментов [11]

Число делений в импульсе	Общее энерговыделение, кг (ТЭ)	Доля кинетической энергии, %	Эквивалентная кинетическая энергия, кг (ТЭ)
$10^{17}$	0,636 (1,4 фунта)	1	0,0064 (0,014 фунта)
$10^{18}$	6,356 (14 фунтов)	5	0,318 (0,7 фунта)
$10^{19}$	63,56 (140 фунтов)	10	6,356 (14 фунтов)

Реализация опытов с ядерными устройствами типа РИР в лабораторных условиях позволила бы существенно расширить возможности экспериментальной базы института. Такой реактор, имеющий максимальный показатель качества, можно с успехом использовать для изучения радиационной стойкости различных материалов, узлов и систем, а также для исследований лазеров с ядерной накачкой [14] и т. п.

### *Заключение*

Более 30 лет назад во ВНИИЭФ был разработан и испытан реактор с разрушающейся активной зоной РИР, генерирующий импульс с выходом  $\sim 1,5 \cdot 10^{19}$  делений и шириной на полувысоте  $\sim 2,5$  мкс; создан и отработан расчетно-экспериментальный метод лабораторной калибровки реактора, обеспечивающий высокую точность прогнозирования энерговыделения в реальном опыте при переходах выше мгновенной критичности  $\sim 3 \beta_{эф}$ .

Экспериментальная информация об уровнях механического воздействия реактора РИР на стенки защитного сооружения позволила создать транспортабельную защитную камеру, обеспечивающую надежную локализацию продуктов взрыва активной зоны малогабаритных ядерных устройств и зарядов ВВ с эквивалентной массой до 100 кг ТЭ.

Экспериментальные данные, полученные с помощью реактора РИР более 30 лет назад, не потеряли своей актуальности в связи с повышением требований к обеспечению ядерной безопасности установок различного типа, изучением новых областей использования ядерной энергии. В частности, в настоящее время реактор типа РИР может применяться для моделирования возможных аварий импульсных реакторов, а также в исследованиях по проблемам лазеров с ядерной накачкой.

Разработка реактора РИР велась под руководством А. М. Воинова. Помимо авторов данной статьи в создании реактора принимали активное участие В. Г. Заграфов, А. С. Матвеев, А. А. Луговой, А. М. Дюдяев, А. Г. Василенко, В. И. Турутов, Н. П. Шемяков, Ю. П. Демин, Г. П. Рудаков, А. В. Киселев и другие специалисты.

### **Список литературы**

1. Шабалин Е. П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. – М.: Атомиздат, 1976.
2. Колесов В. Ф. Аperiodические импульсные реакторы. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007.
3. Кувшинов М. И., Рудаков Г. П., Сибгатуллин И. З. и др. Модернизированный импульсный реактор БИР-2М // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1991. Вып. 2. С. 3–8.
4. Девяткин А. А., Колесов В. Ф., Хоружий В. Х. и др. Методика диагностики состояния тепловыделяющих элементов аperiodических импульсных реакторов с металлической активной зоной // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2008. Вып. 1. С. 12–17.
5. Бать Г. А., Коченов А. С., Кабанов Л. П. Исследовательские ядерные реакторы. – М.: Атомиздат, 1979.

6. Воинов А. М., Колесов В. Ф., Матвеев А. С. и др. Водный импульсный реактор ВИР-2М и его предшественники // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1990. Вып. 3. С. 3–15.

7. Колесов В. Ф., Кувшинов М. И., Воронцов С. В. и др. Критические стенды и импульсные реакторы РФЯЦ-ВНИИЭФ // 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии. Вып. 1. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. С. 136–164.

8. Юфев В. И. Инженерная методика расчета аварийных энерговыделений импульсных реакторов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1991. Вып. 2. С. 20–27.

9. Макаров В. М., Зисельман Б. Г. Рулонированные сосуды высокого давления. – М.: Машиностроение, 1985.

10. Воинов А. М., Воронцова О. С., Воронцов С. В. и др. Защитная камера для обезвреживания и транспортировки аварийных ядерных зарядов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1994. Вып. 2. С. 32–33.

11. Rutherford D. Forecast of criticality experiments and experimental programs needed to support nuclear operations in the United States of America: 1994–1999. Report of LANL LA-12683, 1994 [Electronic resource]. – <http://lib-www.lanl.gov/cgi-bin/getfile?00202666.pdf>.

12. Paxton H. C. A History of critical experiments at Pajarito Site. Report of LANL LA-9685-H, 1983 [Electronic resource]. – <http://atomictraveler.com/LANLPajarito.pdf>.

13. McLaughlin T. P., Monahan S. P., Pruvost N. L. et al. A Review of Criticality Accidents. 2000 Revision. Report of LANL LA-13638, 2000 [Electronic resource]. – <http://orau.org/ptp/Library/accidents/la-13638.pdf>.

14. Карелин А. В., Яковленко С. И. Перспективные возможности лазеров с ядерной накачкой от импульсных источников большой мощности: Препринт ИОФАН № 31 – М., 1992.

## **Metal Core Reactor Planned Destruction: Simulating of Catastrophic Accidents and New Experimental Possibilities**

S. V. Vorontsov, M. I. Kuvshinov, A. T. Narozhnyi, V. A. Popov, V. P. Solov'ev, V. I. Yuferev

*More than 30 years ago the reactor with destructible core RIR with pulse energy output  $\sim 1.5 \cdot 10^{19}$  fissions, half-width  $\sim 2.5 \mu\text{s}$  was designed and tested. In the course of investigation experiment-calculated method of RIR laboratory calibration was generated and worked out. This method secured energy output high accuracy prediction in real experiment with excess reactivity  $\sim 3 \beta_{\text{eff}}$  above prompt criticality. Transportable explosion-proof chamber was designed too. This chamber safely localizes blast products of RIR-type core or high explosive charges with equivalent mass up to 100 kg TNT.*