

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

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Во ВНИИЭФ был разработан и испытан реактор с разрушающейся активной зоной РИР, генерирующий импульс с выходом $\sim 1,5 \times 10^{19}$ делений и шириной на полувысоте $\sim 2,5$ мкс. В ходе работ был создан и отработан расчетно-экспериментальный метод лабораторной калибровки реактора, обеспечивающий высокую точность прогнозирования величины энерговыделения в реальном опыте при переходах выше мгновенной критичности $\sim 3\beta_{эф}$. Создана также транспортабельная защитная камера, обеспечивающая надежную локализацию продуктов взрыва активной зоны малогабаритных ядерных устройств и зарядов ВВ с эквивалентной массой до 100 кг ТНТ.

Ключевые слова: импульсный реактор, разрушающаяся активная зона, импульсы делений, калибровка реактора, транспортабельная защитная камера.

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 // At VNIIEF the reactor with destructible core RIR with pulse energy output $\sim 1,5 \times 10^{19}$ fissions, half-width $\sim 2,5 \mu s$ 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 $\sim 3\beta_{ef}$ 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.

Key words: pulse reactor, destructible core, fission pulse, reactor calibration, transportable safety chamber.

Введение

Разновидностью импульсных ядерных реакторов (ИЯР) являются реакторы аperiодического (самогасящегося) действия, в которых мощные однократные вспышки 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, чем больше флюенс и доступный для облучений объем $K \sim FV/T_{1/2}$ [2]. Обычно данные показатели (F , $T_{1/2}$ и V) взаимосвязаны, и улучшение одного часто достигается за счет подавления других.

Длительность импульса минимальна в компактных АИР на быстрых нейтронах с металлической активной зоной (АЗ) из высокообогащенного ^{235}U , где время жизни мгновенных нейтронов очень мала. Однако из-за эффектов «теплого удара» [1, 2] повышать флюенс в таких реакторах можно только до вполне определенного значения, зависящего 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 теплого удара топливо разбавляют ^{238}U (реактор Super Kukla), инертным материалом (ТИБР), используют специальное топливо (ИГР, ТРЕАТ, 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 4 АИР (БР-К1, БИР-2М, ГИР2, БР-1) представляют собой реакторы с металлической АЗ. Как видно из табл. 1, максимальное удельное энерговыделение для этих реакторов лежит в диапазоне ~20–65 Дж/г. Отметим, что для доведения металлического урана до плавления требуется удельное энерговыделение ~200 Дж/г, а для сублимации ~2000 Дж/г.

В реакторе БИГР в качестве топлива используется однородная смесь диоксида урана с графитом. Данное топливо было специально разработано. Оно 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 уранилсульфата. Но следует отметить, что ВИР представляет собой 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.

Таблица 1

Удельное энерговыделение при максимальном импульсе 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 ₂ +C) | ~336 | 2000 |
| ВИР-2М | 80 | 120 (UO ₂ SO ₄ +H ₂ O) | ~666 | 2600 |

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 2 эксперимента с запланированным разрушением реактора с металлической АЗ. Данный реактор получил название РИР (разрушающийся импульсный реактор) [7].

1. Подготовка и проведение экспериментов с РИР

При подготовке экспериментов с реактором РИР решались три основные задачи:

- разработать конструкцию реактора, обеспечивающую минимальную массу устройства и возможность регулировки реактивности в широких (несколько $\beta_{эф}$) пределах;

- разработать способ калибровки реактивности, позволяющий получить в опыте заданное энерговыделение при переходе в несколько $\beta_{эф}$ над мгновенной критичностью;

- разработать защитное устройство, локализующее радиоактивные материалы после взрыва реактора.

1.1. Конструкция реактора РИР

Схема первого варианта реактора (рис. 1) представлена на рис. 2. 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}U , ^{238}U и Be . Суммарный запас реактивности при заполнении кана-

лов вкладышами, повторяющими структуру активной зоны, составляет $4\beta_{эф}$. Реактивность системы с помощью вкладышей можно изменять с шагом $(0,1-0,6)\beta_{эф}$ в зависимости от размера и материала вкладыша.

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

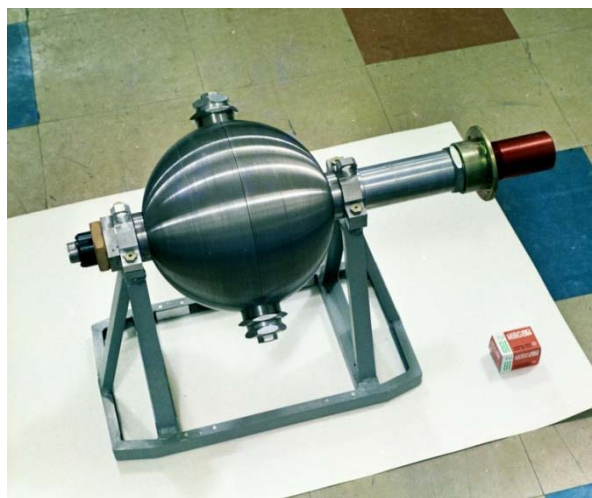


Рис. 1. Внешний вид реактора РИР

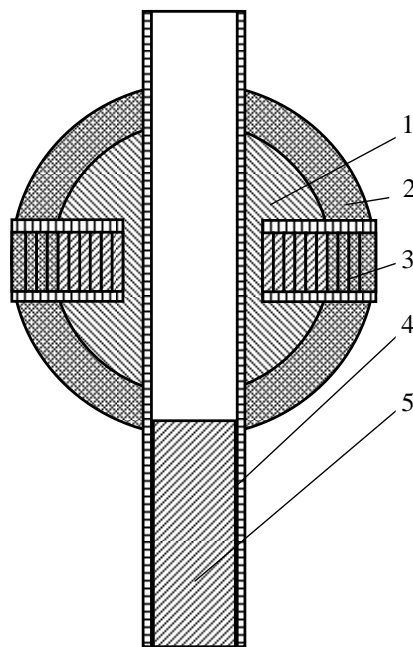


Рис. 2. Схема реактора РИР: 1 – АЗ, 2 – отражатель, 3 – вкладыши для подбора реактивности, 4 – канал ИС, 5 – ИС

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

Выбранная схема реактора РИР 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 (ДМ), 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 важным является умение 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. При расчетном рассмотрении 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 можно было легко корректировать по результатам лабораторных опытов и полигонных испытаний.

В лабораторных условиях с помощью специального калибровочного стенда были проведены экспериментальные исследования характеристик устройства РИР как в подкритическом состоянии, так и в режиме «обычного» импульсного реактора. Используя кинетические параметры, отнормированные по результатам лабораторных экспериментов, были рассчитаны характеристики импульса реактора РИР в режимах, соответствующих разрушению АЗ. С ядерным устройством РИР было проведено два полигонных опыта. Оба раза результаты прогноза хорошо совпадали с экспериментальными данными по энерговыделению, длительности импульса, значению λ и другим характеристикам 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 этой цели служат специальные локализирующие устройства.

Первый эксперимент с РИР проводился в стационарном защитном сооружении, представляющем собой цилиндрическую стальную ампулу диаметром 3 м, длиной 6 м, с толщиной стенки 20 мм. Ампула имела плоские днища, усиленные ребрами жесткости (рис. 3). На рабочей позиции ампула была засыпана слоем грунта толщиной 1,5 м. Реактор установили в центре ампулы, которая перед опытом вакуумировалась до остаточного давления ~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 исключало тем самым утечки 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. 4). 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 ~7 м, масса – 12,5 т. В результате опыта сплошное днище камеры было разрушено, однако центральное сечение, несмотря на значительную (~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 была использована технология рулонированных сосудов высокого давления (РСВД) [9]. В специальных взрывных экспериментах с зарядами взрывчатого вещества (ВВ) типа ТГ 5/5 были определены величины предельных (соответствующих образованию сквозной трещины в стенке камеры) деформаций 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 ~100 кг ТНТ. Созданная камера (рис. 5) является многофункциональной. Помимо проведения экспериментов с реактором типа РИР она может быть использована для обезвреживания аварийных ядерных зарядов [10], обеспечения безопасности при проведении взрывных опытов, гидростатических испытаний и т. д.



Рис. 3. Ампула для опыта РИР-1



Рис. 4. Ампула для опыта РИР-1М



Рис. 5. Многофункциональная камера

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

2. Возможные применения реактора с разрушающейся активной зоной

Ключевым вопросом 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].

Информация о поведении реактора в аварийной ситуации, необходимая для тестирования расчетных методик, в принципе, может быть получена либо из анализа имевших место аварий, либо из результатов специально проведенных 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]). Они не могут быть использованы для прогнозирования последствий аварий АИР с металлической АЗ, поскольку в них применялись 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 достигнутое в реакторе РИР энерговыделение ($1,5 \cdot 10^{19}$ 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 планировавшуюся в США программу экспериментов по импульсному реактору с большим энерговыделением («High-Energy Burst Reactor») [11]. Эксперименты должны были проводиться с использованием АИР типа Godiva (т. е. с АИР на быстрых нейтронах с компактной АЗ из высокообогащенного металлического урана). Сборка должна доводиться до гидродинамического разрушения с соответствующей диагностикой для определения энерговыделения, начального периода, полуширины импульса, состояния топлива (динамического давления и температуры). Энергетические характеристики предлагаемых опытов приведены в табл. 2. Результаты экспериментов предполагалось использовать, в частности, для прогноза последствий аварий на американских АИР с металлической АЗ.

Предлагаемые эксперименты аналогичны опытам с реактором РИР и могут быть выполнены в лабораторных условиях с использованием взрывозащитной камеры в реакторном каземате.

Таблица 2

Энергетические характеристики планируемых экспериментов [11]

| Число делений в импульсе | Общее энерговыделение, кг ТНТ | Доля кинетической энергии, % | Эквивалентная кинетическая энергия, кг ТНТ |
|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|--|
| 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) |

Использование железобетонного защитного сооружения (контейнмента), служащего 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. В качестве контейнмента при этом может служить типовой реакторный каземат, который по оценкам способен многократно выдержать взрыв, эквивалентный взрыву 100 кг ТНТ.

Проведение опытов с ядерными устройствами типа РИР в лабораторных условиях позволило бы существенно расширить возможности экспериментальной базы института. Такой реактор, имеющий максимальное значение качества, можно было бы с успехом использовать для изучения радиационной стойкости различных материалов, узлов и систем, исследований лазеров с ядерной накачкой [14] и т. д.

Заключение

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. В ходе работ был создан и отработан расчетно-экспериментальный метод лабораторной калибровки реактора, обеспечивающий высокую точность прогнозирования величины энерговыделения в реальном опыте при переходах выше мгновенной критичности $\sim 3\beta_{эф}$.

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

Эксперименты с реактором РИР были проведены более 30 лет назад, однако полученная информация и накопленный опыт с течением времени не теряют актуальности. Это связано как с повышением требований к обеспечению ядерной безопасности установок различного

типа, так и с изучением новых областей использования ядерной энергии. В частности, реактор типа РИР может быть использован для моделирования возможных аварий импульсных реакторов, а также для исследований по проблеме лазеров с ядерной накачкой.

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

Список литературы

1. Шабалин Е. П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. – М.: Атомиздат, 1976.
2. Колесов В. Ф. Аперiodические 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 аперiodических 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., Матвеевко 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: В 2 вып. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. Вып. 1. С. 136–164.

8. Юферев 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. Debra Rutherford. Forecast of Criticality Experiments and Experimental Programs Needed to Support Nuclear Operations in the United States of America: 1994-1999. LA-12683, 1994.

12. Paxton H. C. A History of Critical Experiments at Pajarito Site. LA-9685-H, 1983.

13. McLaughlin T. P., Monahan S. P., Pruvost N. L. et al. A Review of Criticality Accidents. 2000 Revision, LA-13638, 2000.

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

Контактная информация –

Воронцов Сергей Владимирович,
первый заместитель директора ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
e-mail: vorontsov@expd.vniief.ru

Статья поступила в редакцию 10.06.2016.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2016, вып. 4, с. 16–23.