

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ БГР НА ИР БИГР

А. Е. Гусев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров

Введение

Культура безопасности является важнейшей, неотъемлемой частью процесса организации любой отрасли человеческой деятельности. И подразумевает под собой программу деятельности, представленную многообразием знаний, норм, правил, навыков, идеалов, идей, ценностей и т.д. в своей совокупности и динамике образующих исторически накапливаемый социальный опыт обеспечения безопасности.

В простейшем интуитивном понимании безопасность – это отсутствие опасности реализации какого-либо риска, способного нанести ущерб, вред в отношении кого-либо или чего-либо.

Обеспечению безопасности в ядерном оружейном комплексе (ЯОК) уделяется большое внимание, а соответствующие задачи по приоритету являются первостепенными.

Данная работа относится к действующему на территории ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» быстрому импульсному исследовательскому реактору.

Краткая характеристика реактора БИГР

В марте 1977 года во ВНИИЭФ был введён в эксплуатацию быстрый импульсный графитовый реактор (БИГР). Установка БИГР относится к классу аperiodических импульсных реакторов и предназначена, главным образом, для генерации мощных одиночных импульсов нейтронов и γ -излучений, но может также применяться в

качестве стационарного источника излучений при работе в статическом режиме. Излучение реактора используется при проведении разнообразных физических экспериментов, таких, как:

а) отработка и калибровка методик измерения интенсивных полей n - γ излучения (исследования различных детекторов излучения, калибровка каналов регистрации для полигонных измерений и т.д.);

б) определение последствий воздействия n - γ излучения на различные материалы и образцы, изготовленные с применением новых технологий (изучается радиационная стойкость материалов, покрытий, и т.д.);

в) определение радиационной стойкости блоков и изделий электроники, автоматики и различных датчиков к ним в активном режиме работы исследуемых объектов;

г) работы по изучению стойкости твэлов ядерных установок в условиях, имитирующих реактивные аварии;

д) активация различных изотопов для получения радиоактивных источников излучения.

Охлаждение активной зоны (АЗ) БИГР осуществляется естественной конвекцией, но с целью сокращения времени остывания АЗ также может использоваться и принудительное воздушное охлаждение [1].

В качестве топливного материала используется спрессованная смесь двуокиси урана с графитом. Отношение числа ядер графита к числу ядер ^{235}U составляет ~ 16 . Обогащение урана изотопом ^{235}U составляет 90 %. Общая масса уран-графитового топлива в АЗ – 833 кг [2].

Компоновка реактора и технологического оборудования в реакторном здании схематично представлена на рис. 1.

смещений колец при увеличении температуры АЗ [1], [2].

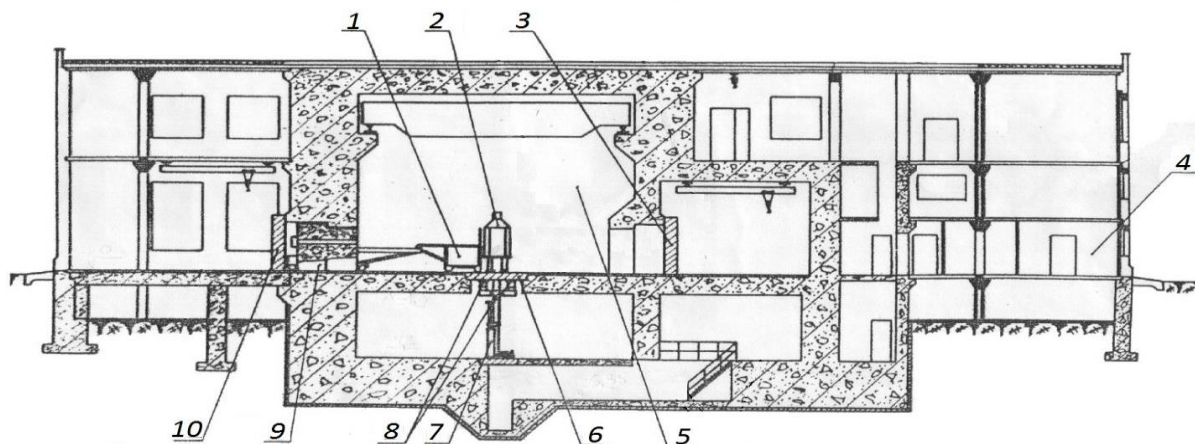


Рис. 1. Схематическое изображение реакторного здания в разрезе: 1 – тележка для образцов; 2 – АЗ; 3, 10 – откатные стальные двери; 4 – лаборатория; 5 – реакторный зал; 6 – опорная плита; 7 – электропривод импульсного стержня (ИС); 8 – механизмы перемещения органов регулирования реактивности (ОРР); 9 – подвижная биологическая защита

Стены и потолок реакторного зала – железобетонные. Они являются биологической защитой реактора. Толщина стен 2-3 м, потолка 1,3 м. Управление реактором осуществляется из пультовой, размещенной в реакторном здании [1].

Схема АЗ реактора БИГР приведена на рис. 2, на рис. 3 показан общий вид реакторного зала. АЗ состоит из трех блоков: неподвижный блок (НБ); блок грубого регулирования (БГР) реактивности и блок точного регулирования (БТР) реактивности. Здесь впервые реализована конструкция с разбиением на дискообразные секции высотой 60 мм. С целью предотвращения чрезмерных термических напряжений топливный материал в каждой секции разбит на отдельные коаксиальные кольца. Каждое кольцо имеет уступы на середине высоты по всей окружности, с помощью которых оно опирается на соседнее кольцо или на внешний чехол. Между кольцами предусмотрены зазоры для радиальных и осевых

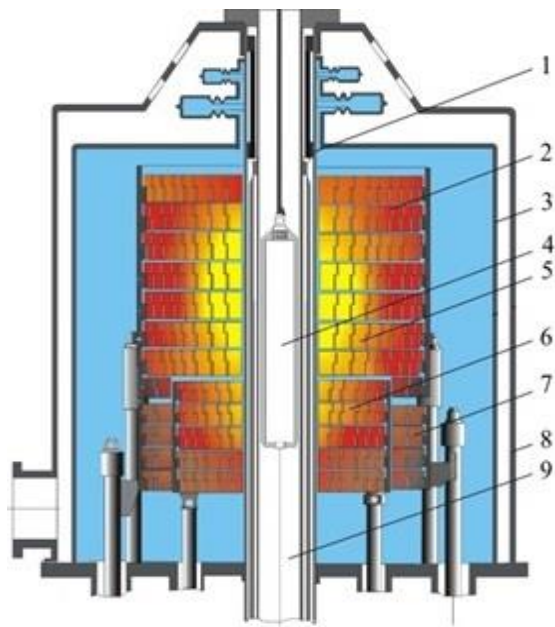


Рис. 2. Схема АЗ реактора БИГР:
1 – ИС; 2 – НБ; 3 – корпус АЗ;
4 – контейнер; 5 – топливные кольца;
6 – БГР; 7 – БТР; 8 – кожух охлаждения;
9 – осевая полость



Рис. 3. Реактор БИГР (реакторный зал)

Собранная АЗ реактора БИГР имеет вид полого цилиндра с вертикальной осью ориентации и размерами по топливным элементам: высота 670 мм, внешний диаметр 760 мм, внутренний диаметр 180 мм. ИС изготовлен в виде тонкостенного полого цилиндра из стали с внутренним диаметром 129 мм, высотой 540 мм и наружным диаметром 156 мм.

Общие подходы обеспечения безопасности

Ядерная безопасность импульсного исследовательского реактора (ИИР) – свойство ИИР ограничивать вероятность и последствия ядерной аварии установленными пределами [3].

Безопасность реактора БИГР основана на выполнении следующих принципов:

1. Принцип эшелонирования барьеров защиты на пути распространения излучения и радиоактивных веществ (РВ). На реакторе система барьеров распространения ионизирующих излучений и РВ состоит из:

а) графитовой матрицы топливного материала;

б) герметичного корпуса АЗ, выполненного из нержавеющей стали и заполненного гелием;

в) реакторного зала с системой вентиляции, снабженной фильтрами.

2. Принцип обеспечения устойчивости здания и конструкции АЗ при внешних и внутренних воздействиях. Активная зона реактора крепится стальными опорами к массивной чугунной плите, опирающейся на железобетонный пол толщиной один метр.

3. Принцип обеспечения независимости и разнообразности способов выполнения своих функций системами безопасности (СБ), что обеспечивает её работоспособность при любых единичных отказах [4].

Системы безопасности

Реактор имеет следующие системы безопасности:

а) защитные: БГР и БТР с механизмами их перемещения;

б) управляющие: счетные каналы измерения потока нейтронов утечки, каналы защиты по мощности, по периоду, по временным параметрам, по давлению газа в корпусе АЗ, по температуре АЗ, и каналы контроля технологических параметров;

в) локализирующие: тепловыделяющие элементы, герметичный газовый контур АЗ, система вытяжной вентиляции с клапанами избыточного давления, герметизирующие двери, фильтры, биологическая защита;

г) обеспечивающие: система контроля радиационной безопасности РБ, система электроснабжения, система снабжения сжатым воздухом, спец. канализация, система пожарной сигнализации.

Исполнительные механизмы БГР и БТР

Приводы БГР и БТР аналогичны и состоят из механизмов перемещения и механизмов упора. Механизмы перемещения

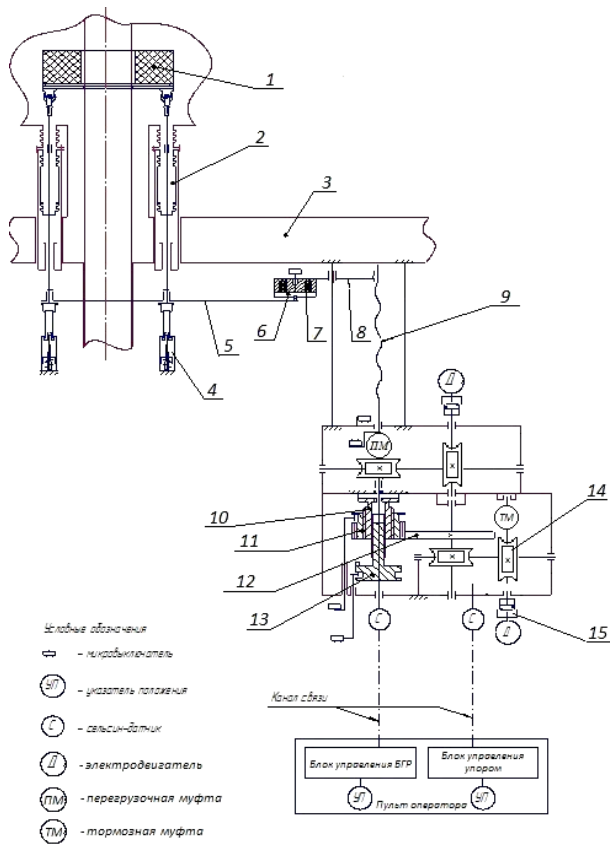


Рис. 4. Кинематическая схема исполнительного механизма БГР:

- 1 – БГР; 2 – сильфон; 3 – плита опорная;
- 4 – демпфер масляный; 5 – траверса БГР;
- 6 – якорь; 7 – катушка электромагнита; 8 – траверса электромагнита; 9 – винт ходовой;
- 10 – втулка резьбовая; 11 – колесо зубчатое упорное; 12 – колесо зубчатое; 13 – втулка шлицевая; 14 – червячная передача; 15 – муфта сцепляемая

обеспечивают дистанционно управляемое перемещение БГР и БТР вверх и вниз, а также быстрый сброс блоков в нижнее положение при поступлении соответствующих сигналов СУЗ и при обесточивании установки. Механизмы упоров позволяют заблаговременно устанавливать некоторые предельные положения блоков и тем самым повышают безопасность работы на реакторе. Механизмы перемещения БГР и БТР представляют собой двухскоростные редукторы, обеспечивающие скорости движения соответственно 0,2 и 5 мм/с. Величины перемещений и их упоров с помощью сельсинов

передаются на указатели положения, расположенные на пульте управления. Верхнее и нижнее положение блока фиксируется конечными выключателями типа Д703. Блоки имеют возможность перемещаться в вертикальном направлении на высоту 145 мм, приближаясь к НБ АЗ до 2 мм. Передача движения осуществляется от расположенного под защитной плитой механизма привода при помощи электромагнита и якоря, шарнирно закрепленного на траверсе. Перемещение электромагнита по цилиндрическим направляющим стойкам осуществляется посредством винтовой пары, обеспечивающей плавность хода и высокую стабильность скоростей перемещения, а также надёжное самоторможение при остановленном электродвигателе. Падение органов регулирования в крайнее нижнее положение происходит под действием силы тяжести при размыкании электрической цепи за счет электромагнитной связи механизма привода и регулирующего блока. Таким образом, обеспечивается быстрый перевод реактора в подкритическое состояние (аварийный сброс). Приобретенная при падении кинетическая энергия гасится двумя масляными демпферами, расположенными под защитой [1].

Проведенное дублирование

При взаимодействии с эксплуатационным персоналом БИГР было сформировано предложение по дублированию датчика контроля крайнего нижнего положения БГР, т.к. данное решение должно быть итак реализовано изначально, следуя изложенным ранее подходам обеспечения безопасности на реакторе.

В процессе проектирования была проведена работа с рабочей конструкторской документацией (РКД) механизма управления БГР и непосредственно на реакторе.

С помощью программного обеспечения КОМПАС 3D были созданы следующие модели (рис. 5, 6).

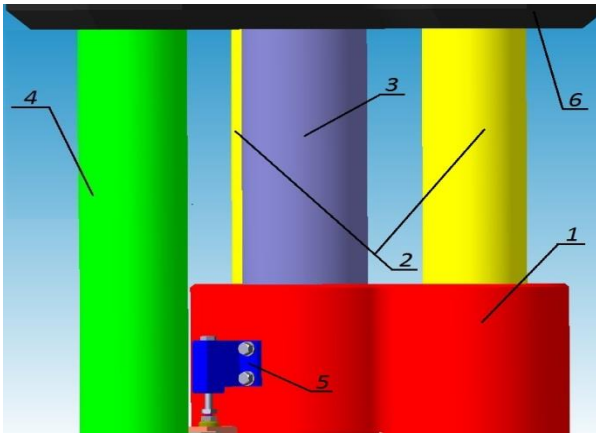


Рис. 5. Место установки датчика контроля крайнего нижнего положения БГР: 1 – траверса (осуществляет вертикальное перемещение электромагнита); 2 – направляющая; 3 – опора; 4 – кронштейн; 5 – верхняя плита

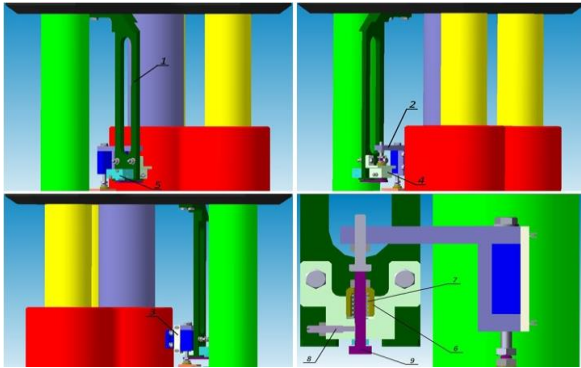


Рис. 6. Конструкция блока устройства контроля нижнего положения БГР: 1 – рамка крепежная; 2 – вилка; 3 – пластина (фиксирует вилку на кронштейне); 4 – функциональный блок; 5 – микровыключатель; 6- упор; 7 – пружина; 8 – фиксатор; 9 – толкатель

Повышение надежности

Важнейшим рассматриваемым эффектом от проделанной работы является влияние на количественный показатель надежности - вероятность безотказной работы системы фиксирования крайнего нижнего положения БГР.

Для оценки данного влияния был выполнен следующий расчет:

В первом случае рассматривается система до введенных изменений.

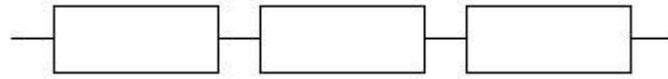


Рис. 7. Последовательное соединение элементов

Здесь для описания подходит модель последовательного соединения элементов (рис.7), где для расчета вероятности безотказной работы системы существует формула [5]:

$$P_{\text{сист } 1} = \prod_i^N P_i, \quad (1)$$

где P_i – вероятность безотказной работы i -го элемента системы, $i = 1, N$.

Допускаются следующие упрощения:

1. Помимо устройства включения микровыключателя, остальные составляющие системы фиксирования нижнего положения БГР, в вероятностном анализе не рассматривались по причине отсутствия каких-либо изменений в их конфигурации.

2. За вероятность безотказной работы устройства принята вероятность безотказной работы самого важного элемента – микровыключателя ($P_i = P_{\text{микровык } i}$).

В рассматриваемом варианте устройство включения микровыключателя типа Д703 в единственном экземпляре. Тогда перепишем уравнение (1) приняв $N = 1$ (равно количеству задействованных микровыключателей в системе), $P_{\text{микровык } i} = P_{\text{Д703}}$:

$$P_{\text{сист } 1} \approx \prod_i^1 P_{\text{микровык } i} \approx P_{\text{Д703}} \quad (2)$$

Во втором случае в систему введен на постоянную работу дублиаж устройства включения микровыключателя (горячее резервирование [5]).

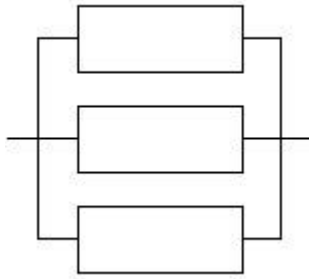


Рис. 8. Параллельное соединение элементов

Так как соединение дублирующих устройств параллельное (рис. 8), и они независимы, то с введенными ранее упрощениями, вероятность отказа всей системы фиксирования нижнего положения БГР описывается формулой:

$$P_{\text{отк. сист. з}} \approx \prod_i^N P_{\text{отк. микровык } i} \approx \prod_i^N (1 - P_{\text{микровык } i}), \quad (3)$$

где $P_{\text{отк. микровык } i}$ – вероятность отказа i -го микровыключателя системы, $i=1, N$.

Из (3) следует:

$$P_{\text{сист. з}} \approx 1 - P_{\text{отк. сист. з}} \approx 1 - \prod_i^N [(1 - P_{\text{микровык } i})] \quad (4)$$

В этом варианте микровыключателей в системе уже 2 ($N=2$), и они оба одинакового типа Д703 ($P_{\text{микровык } i} = P_{\text{Д703}}$). Тогда формула (4) примет вид:

$$P_{\text{сист. з}} \approx 1 - \prod_i^2 [(1 - P_{\text{микровык } i})] \approx 1 - (1 - P_{\text{Д703}})^2 \approx 2P_{\text{Д703}} - P_{\text{Д703}}^2 \approx P_{\text{Д703}}(2 - P_{\text{Д703}}) \quad (5)$$

Воспользуемся стационарным распределением Пуассона, как моделью для описания определенного временного периода работы реактора с известным числом операций на срабатывание системы фиксирования крайнего нижнего положения БГР.

Стационарному Пуассоновскому потоку событий присущи следующие свойства [5]:

1. Ординарность, что выражает собой условие практической невозможности появления двух или нескольких событий в один и тот же момент времени.

2. Отсутствие последействия, которое состоит в том, что вероятность наступления k событий в течение промежутка времени $(T, T+t)$ не зависит от того, сколько событий и как наступали до этого промежутка.

3. Стационарность, означающая, что для любой группы из конечного числа непесекающихся отрезков времени вероятность появления в них соответственно k_1, k_2, \dots, k_n событий зависит только от этих чисел и от длин указанных промежутков времени, но не зависит от их расположения на временной оси. В частности, вероятность появления k событий в промежутке времени $(T, T+t)$ не зависит от T и является функцией только переменных k и t .

Число событий из такого потока на интервале времени $[0, t]$ подчинено следующему распределению:

$$P_k(t) = \frac{\Lambda^k(t)}{k!} \exp(-\Lambda(t)), \quad (6)$$

где $\Lambda(t) = \lambda t$ – ведущая функция потока, $\lambda = \text{const}$ – параметр потока событий (отказов) [5].

Так как число отказов системы фиксирования крайнего нижнего положения БГР подчиняется стационарному распределению Пуассона, она обладает экспоненциальной надежностью:

$$P_{\text{сист. з}}(t) = \exp(-\lambda t) \quad (7)$$

Если речь идет о проведенных n операциях с объектом на интервале времени t , как в нашем случае, то $\Lambda(n) = np$, p – вероятность отказа в операции. Тогда по отношению к рассматриваемой системе выражение (7) принимает вид:

$$P_{\text{сист. з}}(n) = \exp(-nP_{\text{отк. сист. з}}) \quad (8)$$

Для микровыключателя Д703 вероятность отказа срабатывания на требование крайне мала и составляет $P_{\text{отк. Д703}} \approx 10^{-4}$. Используя выражения (2) и (5) получаем:

$$P_{\text{отк. сист. з}} = 1 - P_{\text{сист. з}} \approx 1 - P_{\text{Д703}} \approx P_{\text{отк. Д703}} \quad (9)$$

$$P_{\text{отк. сист. з}} = 1 - P_{\text{сист. з}} \approx 1 - P_{\text{Д703}}(2 - P_{\text{Д703}}) \approx$$

$$\approx 1 - (1 - P_{\text{отк.Д70з}})(2 - (1 - P_{\text{отк.Д70з}})) \approx P_{\text{отк.Д70з}}^2 \quad (10)$$

Подставив поочередно (9) и (10) в (8) получаем:

$$P_{\text{сист.1}}(n) \approx \exp(-nP_{\text{отк.Д70з}}) \quad (11)$$

$$P_{\text{сист.2}}(n) \approx \exp(-nP_{\text{отк.Д70з}}^2) \quad (12)$$

Тогда для оценки примем $n=2000$ и считаем:

$$P_{\text{сист.1}}(2000) \approx 0,8 \quad (13)$$

$$P_{\text{сист.2}}(2000) \approx 0,9 \quad (14)$$

Результаты полученные в (13) и (14) показывают повышение уровня надежности системы фиксирования крайнего нижнего положения БГР за счет увеличения вероятности безотказной работы.

Выводы

В ходе работы была рассмотрена организация обеспечения безопасной эксплуатации на аperiodическом импульсном исследовательском ядерном реакторе БИГР.

По итогу предварительных мероприятий по ознакомлению и изучению приоритетных задач по поддержанию безопасности установки на должном уровне, было принято решение по дублированию устройства фиксирования крайнего нижнего положения БГР. Для достижения поставленной цели при использовании программного обеспечения КОМПАС 3D был разработан проект по реализации технического решения в жизнь.

По результатам оценочного вероятностного анализа безопасности (ВАБ) системы фиксирования нижнего положения БГР до и

после модернизации, выявлен положительный эффект в повышении надежности работы системы. При постоянстве интенсивности выполнения системой своих функций, положительные изменения проявляются более выражено относительно продолжительного временного периода непрерывной работы с, соответственно, большим количеством обращений на срабатывание.

Список литературы

1. Кувшинов М. И., Колесов В. Ф., Войнов А. М., Смирнов И. Г.// Аperiodический импульсный реактор БИГР. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки. Вып. 1. 1988 г. – 3–6 с.
2. Колесов В. Ф.// Аperiodические импульсные реакторы: Монография в 2 т. Т. 1. – Издание 2-е, переработанное и дополненное. Саров. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2007 г. – 68–72 с.
3. НП-048-03.// Правила ядерной безопасности импульсных исследовательских ядерных реакторов. База данных Техэксперт. [Электронный ресурс/URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200035570> Дата обращения 10.08.2017].
4. НП-033-11.// Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии "Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок". База данных Техэксперт. [Электронный ресурс/URL: <http://docs.cntd.ru/document/902289182> Дата обращения 14.08.2017].
5. Волков Ю. В.// Надежность и безопасность ЯЭУ. Учебное пособие по курсу «Надежность и безопасность ЯЭУ». Обнинск. ИАТЭ. 1997 г. – 63–64, 74–76 с.