

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ И НЕЙТРОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ «БИГР + УФН-П»

**В. Ф. Колесов, В. Х. Хоружий, С. В. Воронцов, А. А. Девяткин, М. И. Кувшинов,
В. В. Сажнов**

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл.

Разработана принципиальная конструкция и выполнена серия расчетов статических и динамических нейтронных параметров двухсекционной импульсной установки «БИГР + УФН-П», намечаемой в качестве основного узла облучательной системы с многофункциональным петлевым контуром, предназначенной для испытаний топлива АЭС с различными теплоносителями в нестандартных условиях.

Ключевые слова: двухсекционный импульсный реактор, реактор БИГР, подкритическая сборка, облучательная полость, флюенс нейтронов, коэффициенты нейтронной связи секций.

PRINCIPLE DESIGN AND NEUTRON PARAMETERS OF REACTOR INSTALLATION «BIGR + UFN-P» / V. F. KOLESOV, V. Kh. KHORUZHYY, S. V. VORONTSOV, A. A. DEVYATKIN, M. I. KUVSHINOV, V. V. SAZHNOV // A principle design and a series of calculations of static and dynamic neutron parameters of two-section pulsed installation «BIGR + UFN-P» was developed. It is planned as a basic unit of an irradiation system with a multi-functional loop contour, meant for APP fuel testing with different heat carriers under non-standard conditions.

Key words: a two-section pulsed reactor, reactor BIGR, a subcritical assembly, an irradiation cavity, a neutron fluence, sections neutron coupling factors.

Введение

Современное состояние и перспективы развития ядерной энергетики страны требуют технического перевооружения и модернизации экспериментальной базы отрасли в соответствии с задачами обоснования и повышения безопасности отечественных АЭС и их конкурентоспособности на мировом рынке.

Предполагается, что в России на базе реактора БИГР может быть создана облучательная установка с многофункциональным петлевым контуром для испытаний топлива АЭС с различными теплоносителями в нестандартных условиях. В результате создания такой установки появился бы уникальный комплекс, на котором реализуются возможности для обоснования лицензионных критериев для аварийных ситуаций типа RIA и частично для аварий с потерей теплоносителя типа LOCA.

Установка «БИГР + УФН-П» («Реактор БИГР + Усилитель флюенса нейтронов подкритический») является двухсекционным реактором, способным работать в импульсном и квазиимпульс-

ном режимах. Реактор БИГР (основной компонент рассматриваемого комплекса) относится к классу аperiодических импульсных реакторов (АИР). Он был введен в эксплуатацию в 1977 г. и до сих пор успешно используется как мощный источник n -, γ -излучений для испытания радиационной стойкости различных материалов и изделий и при проведении разнообразных физических экспериментов [1–3].

При ширине импульса на половине высоты $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ с реактор БИГР обладает рекордными для быстрых АИР значениями флюенса нейтронов в доступных для облучений объемах:

$\sim 1 \cdot 10^{16}$ см⁻² в центральном канале диаметром ~ 10 см, высотой ~ 55 см;

$\sim 1 \cdot 10^{15}$ см⁻² на внешней поверхности активной зоны (АЗ) диаметром ~ 70 см.

Получение высоких флюенсов быстрых нейтронов в реакторе БИГР обеспечено благодаря использованию дисперсного топлива, состоящего из смеси графита с двуокисью высокообогащенного урана (90 % по ²³⁵U), и оригинальной конструкции АЗ. Активная зона реактора БИГР набрана из

секций в виде дисков, а секции разбиты на коаксиальные кольца. В секциях каждое уран-графитовое кольцо служит опорой для соседнего внутреннего кольца. Внешние кольца секций расположены на кольцевых опорах из нержавеющей стали. Плоскость опоры каждого кольца выполнена на середине его высоты; этим исключается поступательное перемещение колец в осевом направлении при нагревании топлива (и подскок колец на опорах, если бы разогрев АЗ сопровождался динамическими эффектами).

В применении к реактору из уран-графитового топлива кольцевая структура АЗ со свободной подвеской каждого элемента представляется наиболее естественной и даже безальтернативной. В реакторе с АЗ из хрупкого дисперсного материала было бы трудно реализовать силовое крепление АЗ. Кроме того, встретились бы большие трудности при изготовлении массивных топливных деталей с требуемыми свойствами.

Диаметр и высота АЗ в реакторе БИГР равны 76 и 67 см соответственно. В процессе работы при импульсном ядерном нагреве температура АЗ повышается до ~ 900 °С.

Несмотря на указанные высокие параметры импульсов излучений, имеется ряд задач, которые на реакторе БИГР не могут быть решены. К таким задачам относятся облучения сравнительно крупных (до ~ 20 см) блоков и узлов в полях излучений с флюенсами нейтронов до $\sim 5 \cdot 10^{15}$ см⁻², дозами до 10^4 Гр и пространственной неравномерностью облучения, не превышающей 20 %. Облучение на внешнем потоке реактора БИГР заведомо не удовлетворяет этому условию: уже на расстоянии 20 см от поверхности АЗ реактора флюенс нейтронов падает приблизительно в 2 раза.

С целью расширения возможностей реактора БИГР в части испытания большими флюенсами топлива АЭС предлагается оснастить реактор транспортабельной подкритической ядерной сборкой, способной обеспечивать облучение испытываемых образцов в полости диаметром от 15 до 30 см, высотой 100 см при флюенсе нейтронов до $1 \cdot 10^{16}$ см⁻² с показателем неравномерности, не превышающим 10 %. Именно эту функцию и выполняет подкритическая сборка УФН-П.

В первоначальном варианте установки предполагалось, что диаметр полости в УФН-П равен 30 см, толщина графитового отражателя – 50 см. В настоящее время считается более рациональным вариант полости диаметром 15 или 20 см и графитовый отражатель толщиной 50 или 30 см. Уменьшением диаметра полости в УФН-П и воз-

можным уменьшением толщины отражателя преследуется цель уменьшения габаритов и массы УФН-П, снижения его стоимости и повышение управляемости всей установкой.

В статье представлены принципиальная конструкция связанной реакторной установки «БИГР + УФН-П» и результаты расчета ее статических и динамических нейтронных параметров как с первоначальными, так и пониженными размерами полости и отражателя.

1. Принципиальная конструкция установки «БИГР + УФН-П»

Испытательная установка «БИГР + УФН-П» является двухсекционным реактором, составленным из двух геометрически и материально выделенных, нейтронно-связанных, способных работать в импульсном и квазиимпульсном режимах активных зон. УФН-П представляет собой оснащенную органами регулирования подкритическую сборку (ПС).

Свойства двухсекционных реакторов исследовались во многих работах. Начиная с 1950-х гг. с этими устройствами связывали надежды повышения безопасности энергетических реакторов с расширенным воспроизводством топлива и увеличения глубины выгорания топлива. Рассматривались преимущественно реакторы, в которых деления в АЗ вызываются только быстрыми, а в отражателе-blankете, являющемся зоной воспроизводства, – и быстрыми, и тепловыми нейтронами. Теория двухсекционных реакторов была впервые разработана Р. Эйвери в Аргоннской национальной лаборатории (США) и в 1958 г. представлена на Второй Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии [4]. Имеется ряд работ других авторов по теории двухсекционных реакторов, а также по экспериментам на стационарных двухсекционных критических сборках.

Двухсекционные реакторы обсуждаются и уже нашли применение также в области аperiodических импульсных реакторов (АИР). Анализ двухсекционных АИР был выполнен в 1970–1971 гг. во ВНИИЭФ В. Ф. Колесовым и С. К. Штаревым [5, 6]. Они показали, что двухсекционные АИР, в частности, их разновидности – связанные системы из АИР и подкритическихборок, способны существенно расширять возможности импульсных экспериментов на реакторах. Оснащение АИР связанной с ним ПС позволяет в зависимости от преследуемых целей или получать более высокие

флюенсы нейтронов в местах облучения образцов, или во много раз увеличивать объем полости.

Позднее ряд схем двухсекционных АИР был реализован в виде действующих установок или заложен в важные проекты, например, в проекты мощных лазеров с ядерной накачкой. Из действующих (или действовавших) установок прежде всего должны быть отмечены:

– запущенный в 1980-х гг. во ВНИИТФ (г. Снежинск) импульсный реактор с двумя АЗ БАРС-5 [7];

– запущенный там же в 1994 г. импульсный реактор с тремя АЗ «БАРС-5 + РУН» [8];

– запущенный в 1995 г. в ФЭИ (г. Обнинск) импульсный реактор с двумя АЗ БАРС-6 [9];

– введенный в действие там же в 1999 г. реакторный «Стенд Б» с тремя АЗ [10];

– связанная система из импульсного реактора ACRR и ПС с большой полостью FREC, действовавшая в лаборатории Сандиа, США (расположена эта система в Айдахо). ПС FREC эксплуатировали последовательно в двух модификациях. Первая версия ПС, названная FREC-I, имела полость диаметром 38 см. В 1988 г. ПС FREC-I была заменена на FREC-II с полостью диаметром 50 см [11].

Указанные двух- и трехсекционные импульсные реакторы предоставили существенные новые возможности для облучения больших узлов различных устройств и отработки конструкций лазеров с ядерной накачкой.

Следует сказать, что проектная реализация установки «БИГР + УФН-П» вначале сталкивалась с трудностями. Расчеты показывали, что ввиду больших размеров УФН-П (эти размеры определяются необходимостью обеспечения требуемых значений коэффициента размножения нейтронов $k_{эф}$) даже такой мощный реактор, как БИГР, не в состоянии создать в ведомой им сборке требуемый уровень флюенса нейтронов. В варианте УФН-П с традиционно открытой боковой поверхностью не удавалось получить в полости требуемый флюенс нейтронов.

Эффективным техническим решением, позволившим обойти указанную трудность, явилось предложенное В. Ф. Колесовым оснащение УФН-П массивным, скошенным с обращенной к БИГРу стороны графитовым отражателем. Оно значительно увеличило коэффициенты нейтронной связи компонентов комплекса k_{12} , k_{21} и, кроме того, ввиду уменьшения объема АЗ УФН-П, существенно увеличило флюенс нейтронов в полости, отнесенный

к одному делению в АЗ БИГР. Это предоставило возможность подъема флюенса нейтронов в полости до требуемого уровня.

Общий вид установки «БИГР + УФН-П» с первоначальными размерами полости и отражателя показан на рис. 1. Вид УФН-П в горизонтальном разрезе показан на рис. 2, в вертикальном разрезе – на рис. 3.

УФН-П установлена на подвижной дистанционно управляемой платформе. Ее габаритные размеры (в см) в первоначальной конфигурации:

высота (макс.)	272;
ширина	192;
глубина	152,4;
длина платформы	~250.

В первоначальном варианте предполагалось, что активная зона УФН-П имеет форму полого цилиндра с наружным диаметром 86 см, внутренним 32 см и высотой 100 см. Предполагалось также, что АЗ будет собрана из шестигранных блоков топливного материала размерами 60–70 мм под «ключ» и высотой 70–100 мм. В качестве топлива намечалось использование гомогенной смеси диоксида урана с обогащением 90 % по изотопу ^{235}U с графитом. Отношение числа ядер С к числу ядер U в смеси (С/U) принималось равным 2200 или 4000. Выбор топливной композиции на основе графитовой матрицы был обусловлен ее хорошей термостойкостью, приемлемыми теплофизическими, ядерными и прочностными свойствами. Топливая композиция на основе диоксида урана и графита обеспечивает работоспособность активной зоны при температурах до ~1000 °С. Как уже говорилось, более поздние варианты УФН-П имеют другие размеры полости и могут иметь отражатель с меньшей толщиной. Отношение числа ядер С к числу ядер U в топливной смеси этих вариантов принималось равным 2000.

В целях создания защиты топлива от окисления, сохранения конфигурации и защиты от механических воздействий, предотвращения выхода в окружающее пространство продуктов деления блоки АЗ УФН-П заключались в защитный чехол из нержавеющей стали (поз. 2 на рис. 3). Нежелательный по ряду причин локальный всплеск делений в периферийной, обращенной к УФН-П области АЗ БИГР хотя бы отчасти предотвращался штатным кадмиевым экраном, размещенным на кожухе реактора, а более радикально – экраном из карбида обогащенного бора, закрепленным на скошенной боковой поверхности УФН-П (см. рис. 2).

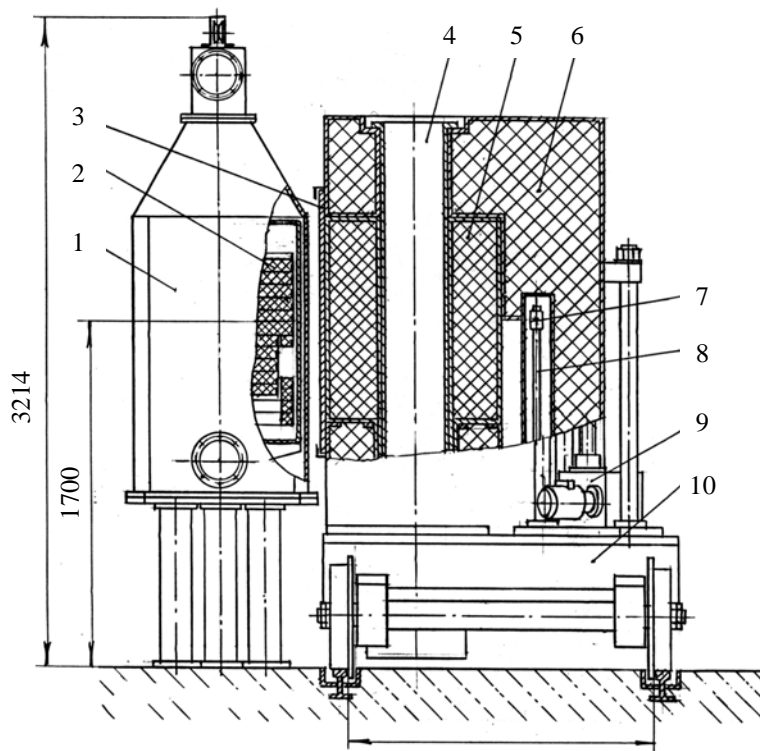


Рис. 1. Схема размещения УФН-П около АЗ реактора БИГР: 1 – реактор БИГР; 2 – активная зона БИГР; 3 – борный экран УФН-П; 4 – экспериментальный канал УФН-П; 5 – активная зона УФН-П; 6 – отражатель графитовый; 7 – нейтронный источник; 8 – механизм нейтронного источника; 9 – привод РБ; 10 – платформа УФН-П

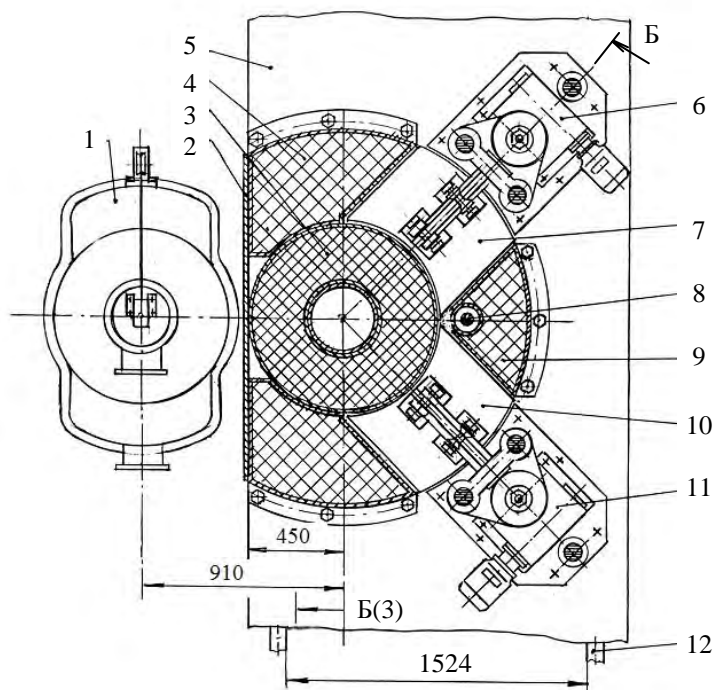


Рис. 2. Горизонтальный разрез АЗ УФН-П: 1 – реактор БИГР; 2 – борный экран УФН-П; 3 – активная зона УФН-П; 4, 9 – отражатель графитовый; 5 – платформа УФН-П; 6, 11 – привод РБ; 7 – регулирующий блок РБ-1; 8 – источник нейтронов; 10 – регулирующий блок РБ-2; 12 – рельсы

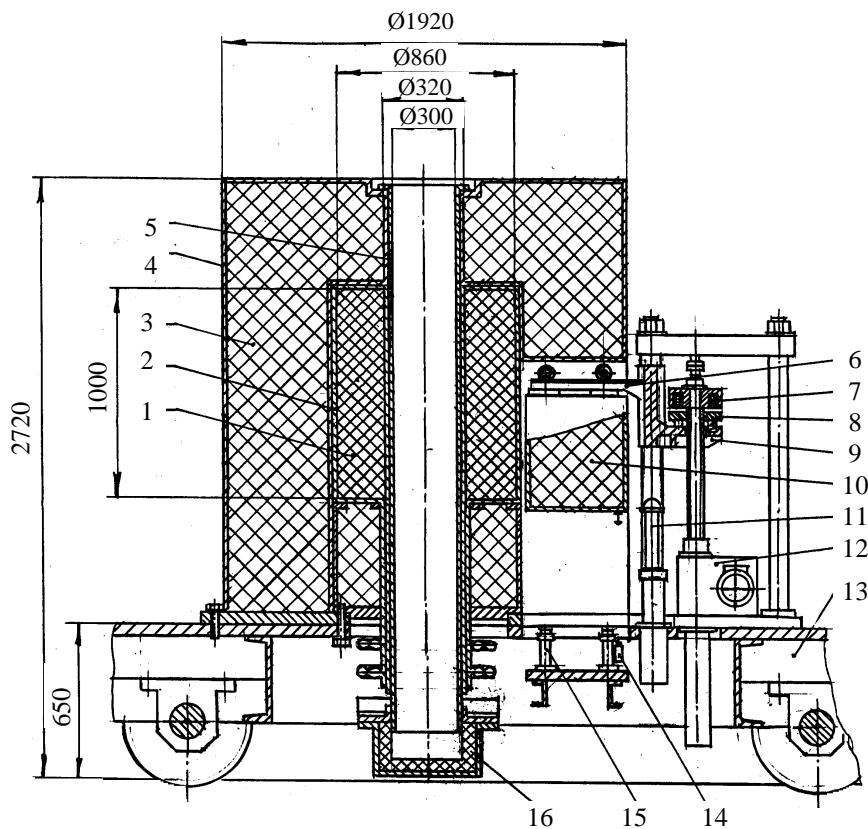


Рис. 3. Вертикальный разрез АЗ УФН-П: 1 – АЗ УФН-П; 2 – чехол АЗ УФН-П; 3 – отражатель графитовый; 4 – чехол отражателя; 5 – экспериментальный канал УФН-П; 6 – траверса; 7 – электромагнит; 8 – якорь электромагнита; 9 – ползун; 10 – регулирующий блок РБ-1; 11 – демпфер гидравлический; 12 – привод РБ; 13 – платформа УФН-П; 14 – выключатель путевой; 15 – опора РБ; 16 – поддон экспериментального канала

В целях регулирования уровня подкритичности сборки и надежного заглушения ее в периоды пребывания в отстойнике в УФН-П были предусмотрены два регулирующих блока (РБ-1 и РБ-2), перемещаемые порознь или синхронно на базе 50 см со скоростью 1 мм/с. РБ-1, РБ-2 представляют собой призматические фрагменты графитового отражателя, размещаемые в удаленной от БИГР области.

2. Расчеты статических и кинетических нейтронных параметров установки «БИГР + УФН-П»

2.1. Первоначальная конфигурация установки с УФН-П, диаметр полости в котором равен 30 толщина графитового отражателя – 50 см

Расчеты статических нейтронных характеристик первоначальной конфигурации установки «БИГР + УФН-П» проводились с помощью про-

граммы С-95 метода Монте-Карло [12]. Кинетические нейтронные характеристики установки определялись с помощью оперативной программы ИЯРФ «Кинрид».

В результате расчетов по программе С-95 были получены для каждой секции системы коэффициенты размножения и времена жизни нейтронов k_j и τ_j , коэффициенты нейтронной связи секций k_{12} , k_{21} , коэффициент гашения реактивности в УФН-П в зависимости от температуры, распределение флюенса нейтронов в осевом канале УФН-П и веса реактивности блоков РБ-1, РБ-2. Было также оценено влияние УФН-П на пространственное распределение плотности делений в АЗ БИГР. Основная часть расчетов была выполнена с нейтронными константами БАС [13], а температурные зависимости нейтронных параметров УФН-П – с константами ENDF/B-VI.

В качестве материала АЗ УФН-П рассматривались уран-графитовые смеси с показателем γ (отношение С/У числа ядер углерода и урана-235 в смеси), равным 1100, 2200 и 4000. Локальный

всплеск делений в периферийной, обращенной к УФН-П области АЗ БИГР понижался с помощью штатного кадмиевого экрана, размещенного на кожухе реактора, а более радикально (если это потребуется) – с помощью экрана из карбида бора, закрепленного на скошенной боковой поверхности УФН-П (см. рис. 2). Используемые в расчетах теплофизические свойства материала АЗ принимались такими же, как у графита. Данные о зависимости энтальпии графита от температуры брались из книги [14].

В результате расчетов было показано, что в рассмотренной конфигурации комплекса «БИГР + УФН-П»:

– флюенс нейтронов в осевом канале УФН-П в зависимости от варианта УФН-П равен $(6-8) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2}$ на одно деление в его АЗ;

– рассматриваемый как отражатель нейтронов реактор БИГР практически не влияет на реактивность УФН-П, а УФН-П увеличивает реактивность БИГР на $\sim 2\%$;

– приближение УФН-П к реактору БИГР сильно возмущает пространственное распределение плотности делений в АЗ: при штатном кадмиевом экране, размещенном на внешнем кожухе БИГР, температура периферийной области АЗ БИГР, обращенной к УФН-П, повышается в 3,7 раза, а при замене кадмиевого экрана борным ($\text{В}_4\text{С}$) экраном толщиной $0,69 \text{ г/см}^2$ – в 2 раза;

– изменение реактивности УФН-П при опускании на 50 см каждого из блоков РБ-1, РБ-2 (см. рис. 2) равно примерно 6 %.

Значения других статических и кинетических параметров комплекса «БИГР + УФН-П» получены следующими.

В варианте УФН-П с АЗ из уран-графитовой смеси с параметром $\gamma = 4000$, графитовым отражателем толщиной 50 см и штатным кадмиевым экраном, размещенным на внешнем кожухе БИГР: внешний радиус АЗ $\cong 46 \text{ см}$; $k_{12} = 0,049$; $k_{21} = 0,059$; $\tau_2 = 8,6 \cdot 10^{-4}$; коэффициент гашения реактивности $1,299 \cdot 10^{-4} \text{ МДж}^{-1}$ в интервале температур от 16,9 до 307 °С; $0,871 \cdot 10^{-4} \text{ МДж}^{-1}$ в интервале температур от 307 до 597 °С и $0,507 \cdot 10^{-4} \text{ МДж}^{-1}$ в интервале температур от 597 до 887 °С.

В варианте УФН-П с АЗ из уран-графитовой смеси с показателем $\gamma = 2200$, графитовым отражателем толщиной 50 см и штатным кадмиевым экраном: внешний радиус АЗ = 42 см; $k_{12} =$

$= 0,038$; $k_{21} = 0,048$; $\tau_2 = 6,3 \cdot 10^{-4}$; коэффициент гашения реактивности в указанных выше интервалах температур соответственно $1,473 \cdot 10^{-4}$; $0,691 \cdot 10^{-4}$ и $0,345 \cdot 10^{-4} \text{ МДж}^{-1}$.

Получено, что спектр флюенса нейтронов в полости этого варианта УФН-П содержит $\sim 8\%$ тепловых нейтронов, $\sim 9\%$ – с энергией выше 1 МэВ и 29 % – с энергией выше 0,1 МэВ. Пространственная неоднородность флюенса нейтронов в экваториальной плоскости полости не превышает 10 %.

В расчетах переходных процессов комплекса коэффициент гашения реактивности, время жизни мгновенных нейтронов и энерговыделение за импульс в реакторе БИГР принимались равными соответственно $0,695 \cdot 10^{-5} \text{ МДж}^{-1}$; $3,6 \cdot 10^{-7} \text{ с}$ и 280 МДж. Эффективная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{эф}}$ как в БИГР, так и в УФН-П предполагалась равной $0,78 \cdot 10^{-2}$.

В табл. 1, 2 представлены параметры импульсов делений в установке «БИГР + УФН-П» с показателем γ разбавления топлива в УФН-П, равным 2200, и с двумя типами экрана при флюенсах нейтронов за импульс в осевой полости УФН-П $4 \cdot 10^{15}$, $6 \cdot 10^{15}$ и $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Приведены энерговыделения Y_2 за импульс в УФН-П, соответствующие этим энерговыделениям средние температуры АЗ УФН-П, требуемые для производства указанных импульсов начальные и стартовые реактивности секций Δk_1 , Δk_2 и комплекса в целом Δk , значения тех же реактивностей в конце импульсов, реактивность δk_1 , которую должен вносить импульсный блок БИГР при генерировании импульсов в предположении 30- или 10-секундного стартового периода разгона комплекса (здесь предполагается, что генерирование импульса производится с помощью органов регулирования реактивности БИГР). Приведенные в табл. 1, 2 реактивности указаны с учетом запаздывающих нейтронов.

Борный экран, в сравнении с кадмиевым, значительно эффективней защищает АЗ БИГР от нежелательных перекосов в пространственном распределении температуры. Вместе с тем замена кадмиевого экрана борным, если таковая потребуется, повлечет за собой неблагоприятное уменьшение коэффициентов связи k_{12} , k_{21} . В случае борного экрана и $\gamma = 2200$ эти коэффициенты получены равными: $k_{12} = 0,0289$, $k_{21} = 0,0395$ (в случае штатного экрана $k_{12} = 0,038$; $k_{21} = 0,0480$).

Таблица 1

Параметры импульсов делений в комплексе «БИГР + УФН-П» с показателем разбавления топлива γ , равным 2200 ($Y_1 = 280$ МДж; имеется штатный кадмиевый экран БИГР)

Параметр		Флюенс нейтронов в осевой полости УФН-П, см ⁻²		
		4·10 ¹⁵	6·10 ¹⁵	8·10 ¹⁵
Y ₂ , МДж		143,5	215,25	287
Средняя температура АЗ УФН-П, °С		168	244	289
Начальные реактивности ×100	Δk_1	-1,25	-2,22	-3,20
	Δk_2	-7,71	-4,06	-1,97
	Δk	0,875	1,23	1,73
Стартовые реактивности ×100 (стартовый период разгона 30 с)	Δk_1	-2,14	-4,14	-8,35
	Δk_2	-7,71	-4,06	-1,97
	Δk	0,172	0,172	0,172
	δk_1	0,89 (1,1 $\beta_{эф}$)	1,92 (2,5 $\beta_{эф}$)	5,2 (6,6 $\beta_{эф}$)
Стартовые реактивности ×100 (стартовый период разгона 10 с)	Δk_1	-1,96	-3,86	-7,68
	Δk_2	-7,71	-4,06	-1,97
	Δk	0,312	0,312	0,312
	δk_1	0,71 (0,9 $\beta_{эф}$)	1,64 (2,1 $\beta_{эф}$)	4,48 (5,7 $\beta_{эф}$)
Реактивности в конце импульса ×100	Δk_1	-1,44	-2,42	-3,39
	Δk_2	-9,82	-7,23	-6,20
	Δk	0,348	0,079	-0,299
Ширина импульса в УФН-П на половине высоты, мс		580	195	128

Таблица 2

Параметры импульсов делений в комплексе «БИГР + УФН-П» с показателем разбавления топлива γ , равным 2200 ($Y_1 = 280$ МДж; имеется экран из карбида бора)

Параметр		Флюенс нейтронов в осевой полости УФН-П, см ⁻²		
		4·10 ¹⁵	6·10 ¹⁵	8·10 ¹⁵
Y ₂ , МДж		145	217,5	290
Средняя температура АЗ УФН-П, °С		155	223	292
Начальные реактивности ×100	Δk_1	-0,80	-1,55	-2,30
	Δk_2	-5,96	-2,88	-1,08
	Δk	0,872	1,23	1,75
Стартовые реактивности ×100 (стартовый период разгона 30 с)	Δk_1	-1,69	-3,56	-8,96
	Δk_2	-5,96	-2,88	-1,08
	Δk	0,172	0,172	0,172
	δk_1	0,89 (1,1 $\beta_{эф}$)	2,01 (2,6 $\beta_{эф}$)	6,7 (8,5 $\beta_{эф}$)
Стартовые реактивности ×100 (стартовый период разгона 10 с)	Δk_1	-1,51	-3,26	-7,90
	Δk_2	-5,96	-2,88	-1,08
	Δk	0,312	0,312	0,312
	δk_1	0,71 (0,9 $\beta_{эф}$)	1,71 (2,2 $\beta_{эф}$)	5,6 (7,2 $\beta_{эф}$)
Реактивности в конце импульса ×100	Δk_1	-0,99	-1,74	-2,49
	Δk_2	-8,10	-6,09	-5,35
	Δk	0,357	0,102	-0,251
Ширина импульса в УФН-П на половине высоты, мс		587	193	128

Из табл. 1, 2 следует, что производство импульсов с флюенсом $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ во всех случаях, в особенности при наличии борного экрана, может осуществляться лишь при относительно небольших подкритичностях и значительном запасе реактивности у импульсного блока БИГР. Наличие борного экрана во всех случаях приводит к заметному ухудшению параметров установки, выражающемуся, главным образом, в снижении уровня подкритичности УФН-П. Обращает на себя внимание сильная зависимость подкритичности УФН-П и требуемого запаса реактивности импульсного блока БИГР от уровня флюенса нейтронов. Так при снижении флюенса на 25 %, т. е. до $6 \cdot 10^{15} \text{ нейтр./см}^2$, глубина подкритичности УФН-П увеличивается в 2–3 раза, а требуемый запас реактивности импульсного блока уменьшается примерно в 2,5 раза.

Ввод необходимой избыточной реактивности при генерировании импульса делений в комплексе «БИГР + УФН-П» может быть реализован с помощью модернизированного импульсного блока, перемещаемого в осевом канале АЗ реактора БИГР. Существующая штатная система импульсного блока в БИГР включает варианты с вводом реактивности от 0,8 до $1,7\beta_{\text{эф}}$. Возможно также использование блока с реактивностью $2,8\beta_{\text{эф}}$.

При модернизации БИГР можно простыми средствами реализовать быстрый пневматический ввод (вывод) импульсного блока с изменением реактивности БИГР до $10\beta_{\text{эф}}$. Эта оценка выполнена на основании экспериментальных данных, полученных при физическом пуске реактора и при его эксплуатации. В случае, если бы не удалось обеспечить требуемый ресурс реактивности импульсного блока БИГР, генерирование импульса можно было бы осуществлять с помощью одного из РБ УФН-П.

2.2. Установка с УФН-П, диаметр полости в котором равен 15 или 20 см, толщина графитового отражателя – 30 см

В первой измененной конфигурации установки «БИГР + УФН-П» принято, что диаметр полости в УФН-П равен 15 или 20 см, высота АЗ и толщина графитового отражателя равны 100 и 30 см соответственно, отношение числа ядер углерода и изотопов ^{235}U в топливе равно 2000. Предполагалось, что между активными зонами БИГР и УФН-П устанавливается экран из насыпного карбида природного бора толщиной 0,5 см (поверхностная плотность $^{10}\text{B} \sim 0,03 \text{ г/см}^2$) или такой же толщины

экран из металлического бора с обогащением по ^{10}B 85 % (поверхностная плотность $^{10}\text{B} \sim 0,85 \text{ г/см}^2$).

Расчеты статических нейтронных характеристик трехмерной конфигурации установки «БИГР + УФН-П» проводились с помощью программы С-007 метода Монте-Карло [15] в двухзонном приближении [16]. Гашение реактивности в реакторе БИГР и УФН-П рассчитывалось с учетом зависимости теплофизических параметров АЗ от температуры. Для реактора БИГР согласно [17]

$$k_{11}(t) = k_{11}(0) - 8,666 \cdot 10^{-6} Y_1 + 0,1666 \cdot 10^{-6} Y_1^{3/2} - 5,9 \cdot 10^{-12} Y_1^3,$$

где $Y_1(t)$ измеряется в МДж.

Для УФН-П с полостью диаметром 15 см

$$k_{22}(t) = k_{22}(0) - 8,8031 \cdot 10^{-5} \Theta_2 + 4,1842 \cdot 10^{-7} \Theta_2^{1,59};$$

для УФН-П с полостью диаметром 20 см

$$k_{22}(t) = k_{22}(0) - 8,6965 \cdot 10^{-5} \Theta_2 + 3,4518 \cdot 10^{-7} \Theta_2^{1,61},$$

где $\Theta_2(t)$ – максимальное повышение температуры в УФН-П, соответствующее энерговыделению $Y_2(t)$. Θ_2 определялось с использованием следующей аналитической аппроксимации зависимости теплоемкости графита от температуры, отсчитываемой от 20 °С,

$$C(\Theta) = (A\Theta + B)^\gamma \text{ Дж}\cdot\text{г}^{-1}\cdot\text{град}^{-1}, \\ A = 0,010348, B = 0,24295, \gamma = 0,27.$$

Эта аппроксимация с точностью 3–4 % описывает экспериментальную зависимость теплоемкости при температурах от 0 °С до 1700 °С [18] и позволяет получить аналитическое выражение для энтальпии

$$H(\Theta) = \int_0^\Theta d\Theta' C(\Theta') = \frac{1}{A(\gamma+1)} \left[(A\Theta + B)^{\gamma+1} - B^{\gamma+1} \right], \\ \text{Дж}\cdot\text{г}^{-1}.$$

В последующем полученные интегральные уравнения кинетики сводились к дифференциальным и интегрировались с помощью метода Гира [19].

Основная часть расчетов была выполнена с нейтронными константами ENDF/B-VI.

Спектр флюенса нейтронов, рассчитанный для центра полости УФН-П, представлен в табл. 3. Спектр содержит ~8 % тепловых нейтронов и ~30 % – с энергией выше 0,1 МэВ. Внешний радиус АЗ УФН-П в вариантах с полостями 15 и 20 см получен равным 38,5 см и 41 см соответственно.

Таблица 3

Спектр флюенса нейтронов в центре УФН-П

$E_{i-1} - E_i$	ΔF_i
0 – 0,215 эВ	0,087
0,215 – 4,65 эВ	0,105
4,65 – 100 эВ	0,126
0,1 – 1 кэВ	0,114
1 – 10 кэВ	0,128
10 – 100 кэВ	0,143
0,1 – 0,4 МэВ	0,103
0,4 – 1,4 МэВ	0,116
1,4 – 4 МэВ	0,068
4 – 14 МэВ	0,010

В расчетах переходных процессов комплекса энерговыделение за импульс в реакторе БИГР принималось равным 280 МДж. Эффективная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{эф}$ как в БИГР, так и в УФН-П, равнялась $0,78 \cdot 10^{-2}$.

Полученные в расчетах значения коэффициентов нейтронной связи активных зон k_{12} , k_{21} в установке «БИГР + УФН-П» в случае полостей диаметром 15 или 20 см и экранов из насыпного карбида природного бора или металлического обогащенного бора приведены табл. 4. Параметры установки «БИГР + УФН-П» и импульсов делений в ней при тех же условиях представлены в табл. 5, 6. В этих таблицах приведены энерговыделения Y_1 , Y_2 за импульс и значения коэффициента размножения нейтронов k_{11} , k_{22} в БИГР и УФН-П соответственно, полный для установки коэффициент размножения нейтронов $k_{эф}$, ширина импульса на половине высоты $\theta_{1/2}$ в сборке УФН-П и в ней же максимальные значения флюенса нейтронов в полости за импульс F_2 и температуры в АЗ T_2 .

Картины изменения мощности в импульсах делений в компонентах установки «БИГР + УФН-П» показаны на рис. 4–7.

Таблица 4

Коэффициенты нейтронной связи активных зон в установке «БИГР + УФН-П»

Коэффициенты связи	$^{10}\text{B} \sim 0,03 \text{ г/см}^2$		$^{10}\text{B} \sim 0,85 \text{ г/см}^2$	
	Полость диаметром 15 см	Полость диаметром 20 см	Полость диаметром 15 см	Полость диаметром 20 см
k_{12}	0,0282	0,0258	0,0170	0,0155
k_{21}	0,0315	0,0325	0,0238	0,0244

Таблица 5

Параметры установки «БИГР + УФН-П» и импульсов делений в УФН-П в случае слабого экрана ($^{10}\text{B} \sim 0,03 \text{ г/см}^2$)

Y_1 , МДж	Y_2 , МДж	$k_{эф}$	k_{11}	k_{22}	$\theta_{1/2}$, мс	F_2 , 10^{16} см^{-2}	T_2 , °C
БИГР+УТС(полость диаметром 15см)							
280	78	1,00859	1,00041	0,90	90,7	0,33	142
281	85	1,00869	0,99969	0,91	97,5	0,36	152
280	94	1,00882	0,99882	0,92	105	0,40	163
280	104	1,00901	0,99777	0,93	111	0,44	176
280	117	1,00929	0,99647	0,94	115	0,50	192
279	132	1,00971	0,99483	0,95	117	0,56	211
279	153	1,01036	0,99272	0,96	115	0,65	236
280	181	1,01140	0,98994	0,97	110	0,77	268
281	220	1,01304	0,98615	0,98	102	0,94	310
280	272	1,01555	0,98078	0,99	92,1	1,16	365
279	348	1,01924	0,97307	1,00	80,0	1,48	442
БИГР+УТС(полость диаметром 20см)							
281	81	1,00855	1,00083	0,90	90,4	0,29	135
280	88	1,00863	1,00013	0,91	98,9	0,32	143
280	97	1,00875	0,99930	0,92	106	0,35	154
280	108	1,00892	0,99830	0,93	114	0,39	166
281	121	1,00918	0,99706	0,94	118	0,44	182
279	138	1,00956	0,99548	0,95	121	0,50	200
280	160	1,01017	0,99346	0,96	120	0,58	224
281	190	1,01114	0,99076	0,97	116	0,69	254
280	230	1,01270	0,98706	0,98	107	0,84	294
280	287	1,01514	0,98179	0,99	96,4	1,04	349
281	371	1,01879	0,97417	1,00	83,3	1,35	426

Параметры установки «БИГР + УФН-П» и импульсов делений
в УФН-П в случае сильного экрана ($^{10}\text{В} \sim 0,85 \text{ г/см}^2$)

Y_1 , МДж	Y_2 , МДж	$k_{эф}$	k_{11}	k_{22}	$\theta_{1/2}$, мс	F_2 , 10^{16} см^{-2}	T_2 , °С
Полость диаметром 15 см							
281	60	1,00840	1,00467	0,90	56,2	0,26	117
281	65	1,00844	1,00433	0,91	63,9	0,28	125
281	72	1,00849	1,00392	0,92	72,7	0,31	134
281	80	1,00857	1,00342	0,93	82,3	0,34	145
281	90	1,00869	1,00280	0,94	92,1	0,38	158
280	103	1,00888	1,00201	0,95	101	0,44	175
280	120	1,00920	1,00098	0,96	108	0,51	195
280	142	1,00977	0,99960	0,97	111	0,60	223
280	174	1,01080	0,99766	0,98	109	0,74	259
279	219	1,01269	0,99486	0,99	101	0,93	310
281	290	1,01600	0,99071	1,00	88,6	1,24	383
Полость диаметром 20 см							
279	61	1,00838	1,00489	0,90	54,9	0,22	110
279	66	1,00841	1,00457	0,91	62,9	0,24	117
280	74	1,00846	1,00419	0,92	71,7	0,27	126
280	82	1,00853	1,00371	0,93	81,6	0,30	136
279	92	1,00863	1,00312	0,94	93,0	0,33	148
281	106	1,00881	1,00238	0,95	102	0,38	165
281	124	1,00910	1,00140	0,96	111	0,45	185
279	147	1,00961	1,00006	0,97	115	0,53	210
281	182	1,01058	0,99821	0,98	113	0,66	246
279	230	1,01237	0,99546	0,99	106	0,84	294
281	306	1,01560	0,99136	1,00	92,5	1,11	367

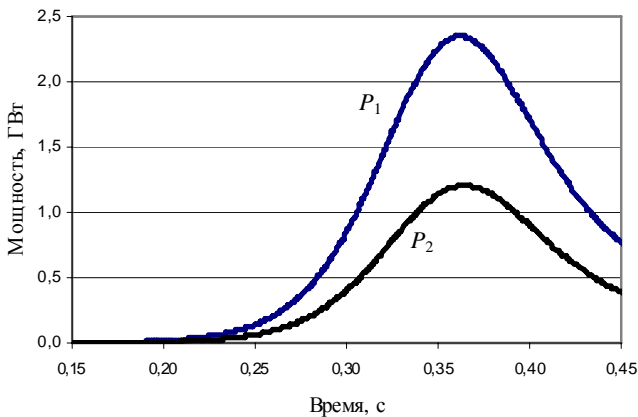


Рис. 4. Зависимость от времени мощности компонентов в установке «БИГР + УФН-П» с полостью диаметром 15 см, сильным экраном ($^{10}\text{В} - 0,85 \text{ г/см}^2$) и $k_{22} = 0,97$:
 P_1 — мощность БИГР; P_2 — мощность УФН-П

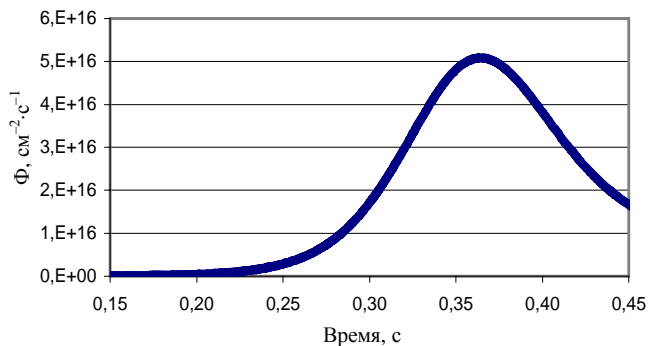


Рис. 5. Плотность потока нейтронов Φ в центре полости УФН-П в установке «БИГР + УФН-П» с полостью диаметром 15 см, сильным экраном ($^{10}\text{В} - 0,85 \text{ г/см}^2$) и $k_{22} = 0,97$

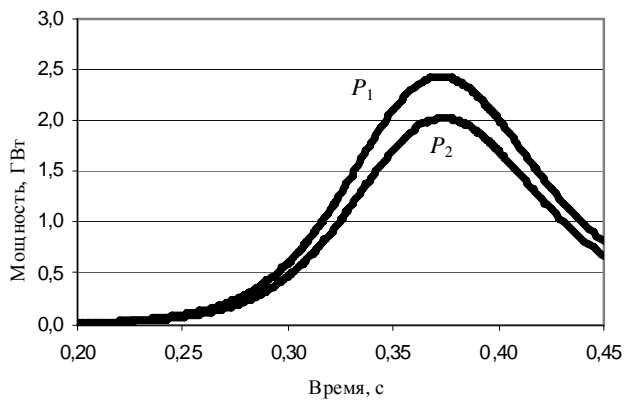


Рис. 6. Зависимость от времени мощности компонентов в установке «БИГР + УФН-П» с полостью диаметром 20 см, сильным экраном ($^{10}\text{B} - 0,85 \text{ г/см}^2$) и $k_{22} = 0,99$: P_1 — мощность БИГР; P_2 — мощность УФН-П

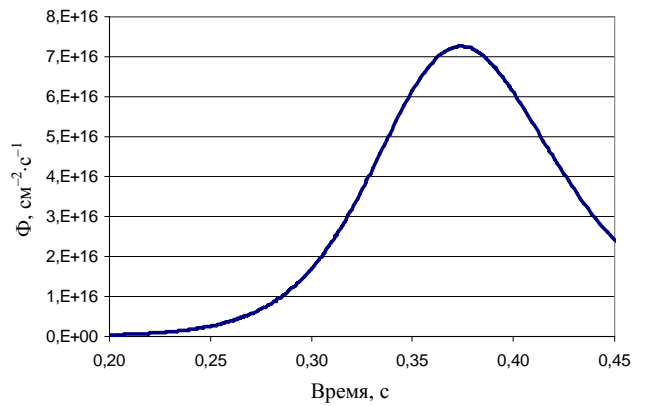


Рис. 7. Плотность потока нейтронов Φ в центре полости УФН-П в установке «БИГР + УФН-П» с полостью диаметром 20 см, сильным экраном ($^{10}\text{B} - 0,85 \text{ г/см}^2$) и $k_{22} = 0,99$

Таблица 7

Параметры установки «БИГР + УФН-П» и импульсов на запаздывающих нейтронах в УФН-П в варианте полости диаметром 20 см и экрана ($^{10}\text{B} \sim 0,85 \text{ г/см}^2$)

Y_1 , МДж	Y_2 , МДж	k_{11}	k_{22}	$\theta_{1/2}$, с	F_2 , 10^{16} см^{-2}	T_2 , °С
Начальный период разгона = 30 с, $k_{3\Phi} = 1,00148$						
280	141	0,99380	0,96	101	0,51	203
250	156	0,99108	0,97	104	0,57	221
Начальный период разгона = 10 с, $k_{3\Phi} = 1,00266$						
280	103	0,99533	0,94	220	0,37	161
248	108	0,99413	0,95	224	0,39	166
178	95	0,99236	0,96	226	0,34	152
104	73	0,98947	0,97	226	0,26	126

Экран из металлического обогащенного бора, в сравнении с экраном из насыпного карбида природного бора, значительно эффективней защищает АЗ БИГР от нежелательных перекосов в пространственном распределении температуры. Вместе с тем замена экрана второго типа экраном первого типа, если таковая потребуется, повлечет за собой неблагоприятное уменьшение коэффициентов связи k_{12} , k_{21} . В случае экрана из насыпного карбида природного бора эти коэффициенты получены равными: $k_{12} = 0,0258$, $k_{21} = 0,0325$, а в случае экрана из металлического обогащенного бора — $k_{12} = 0,0155$, $k_{21} = 0,0244$.

В табл. 7 приведены параметры импульсов делений на запаздывающих нейтронах, реализующиеся в установке «БИГР + УФН-П» с сильным экраном ($^{10}\text{B} \sim 0,85 \text{ г/см}^2$) и с полостью в УФН-П 20 см.

Данные табл. 5, 6 показывают, что при начальной подкритичности сборки с полостью диаметром 20 см на уровне 1–2 % в установке

с экраном из насыпного карбида бора могут генерироваться импульсы с флюенсом нейтронов $1,04 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и $0,84 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, а в установке с экраном из металлического обогащенного бора — $0,84 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и $0,66 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Как видим, присутствие более сильного борного экрана приводит к заметному ухудшению параметров установки, выражающемуся, главным образом, в снижении уровня флюенса нейтронов при заданной подкритичности УФН-П.

Ширина на половине высоты указанных импульсов составляет, соответственно, (96,4–113) мс.

В установке «БИГР + УФН-П» с диаметром полости 15 см в сравнении с установкой, диаметр полости в которой равен 20 см, при тех же подкритичностях УФН-П на уровне 1–2 % и экранах ширина на половине высоты указанных импульсов уменьшится примерно на 5 %, а флюенс нейтронов в полости повысится примерно на 12 %.

Максимальная температура топлива в сборке УФН-П в указанных импульсах будет равняться

246–365 °С, а энерговыделение за импульс 174–287 МДж. Загрузка обогащенного урана в АЗ УФН-П при диаметре полости 15 и 20 см составит 8,28 и 9,18 кг соответственно.

2.3. Установка с УФН-П, диаметр полости в котором равен 15 или 20 см, толщина графитового отражателя – 50 см

Была рассчитана также установка, конфигурация которой отличалась от первоначальной лишь уменьшенным, равным 15 или 20 см, диаметром полости. Толщина графитового отражателя в этом случае, как и в первоначальном варианте, принималась равной 50 см.

Получено, что в конфигурации с полостью диаметром 15 см внешний радиус АЗ УФН-П равен 34 см, масса урана в АЗ – 6,38 кг, максимальное повышение температуры топлива и максимальный флюенс нейтронов в полости связаны с энерговыделением в импульсе как $1,43\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{МДж}^{-1}$ и $4,7\cdot 10^{13}\text{ см}^{-2}\cdot\text{МДж}^{-1}$ соответственно. Для конфигурации с полостью диаметром 20 см значения аналогичных характеристик равны 36 см, 6,94 кг, $1,32\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{МДж}^{-1}$ и $4,1\cdot 10^{13}\text{ см}^{-2}\cdot\text{МДж}^{-1}$.

Другие параметры установки «БИГР + УФН-П» и импульсов делений в УФН-П в случае полости диаметром 15 или 20 см и графитового отражателя толщиной 50 см приведены в табл. 8.

Если сравнить параметры установки «БИГР + УФН-П», приведенные в настоящем разделе и в разделе 2.1, то можно увидеть, что предложен-

ное уменьшение диаметра полости в УФН-П от 30 см до (15–20) см имеет следствием:

- значительное повышение доминирующей роли реактора БИГР в комплексе, что выражается, в частности, в увеличении флюенса нейтронов за импульс в полости УФН-П при заданном уровне подкритичности сборки;
- уменьшение объема и массы АЗ УФН-П, а также объема и массы всей сборки;
- уменьшение массы обогащенного урана в АЗ УФН-П.

Очень важно также, что достигаемое путем уменьшения диаметра полости повышение доминирующей роли реактора БИГР приведет к упрощению задачи управления комплексом, а именно – к снижению жестких требований к запасу реактивности органов управления как самого реактора БИГР, так и сборки УФН-П.

Оптимальной в отношении достижимого за импульс уровня флюенса нейтронов является конфигурация УФН-П с полостью диаметром 15 см и отражателем толщиной 50 см. Максимальное значение флюенса нейтронов в этой конфигурации равняется $1,321\cdot 10^{16}\text{ см}^{-2}$, что примерно на 35 % выше максимального флюенса нейтронов в первоначальной конфигурации УФН-П с полостью диаметром 30 см и отражателем толщиной 50 см. Конфигурация УФН-П с полостью диаметром 15 см и более легким в сравнении с оптимальной сборкой отражателем, т. е. с отражателем толщиной 30 см, имеет в сравнении с ней примерно на 15 % меньшее значение максимального флюенса.

Таблица 8

Параметры установки «БИГР + УФН-П» и импульсов делений в УФН-П в случае полости диаметром 15 или 20 см и графитового отражателя толщиной 50 см

Экран с плотностью $^{10}\text{В}$ 0,03 г/см ²		Экран с плотностью $^{10}\text{В}$ 0,85 г/см ²	
$\Delta k_2 = -0,01$		$\Delta k_2 = -0,02$	
Диаметр полости 15 см			
$k_{12} = 0,0326; k_{21} = 0,0326$		$k_{12} = 0,0252; k_{21} = 0,0252$	
$Y_2, \text{МДж}$	281,1	226,8	232,8
$T_2, \text{ }^{\circ}\text{C}$	402	324,3	332,9
$F_2, \text{ см}^{-2}$	$1,321\cdot 10^{16}$	$1,066\cdot 10^{16}$	$1,094\cdot 10^{16}$
Диаметр полости 20 см			
$k_{12} = 0,0333; k_{21} = 0,0333$		$k_{12} = 0,0258; k_{21} = 0,0258$	
$Y_2, \text{МДж}$	293,7	235,8	244,2
$T_2, \text{ }^{\circ}\text{C}$	388	311	322
$F_2, \text{ см}^{-2}$	$1,204\cdot 10^{16}$	$1,108\cdot 10^{16}$	$1,148\cdot 10^{16}$
			$0,901\cdot 10^{16}$

Заключение

Разработана принципиальная конструкция и выполнена серия расчетов статических и динамических нейтронных параметров двухсекционной установки «БИГР + УФН-П» с несколькими значениями диаметра полости и толщины графитового отражателя в подкритической сборке УФН-П. Программой инновационного развития и технологической модернизации экспериментальной базы ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» указанная установка намечена в качестве основного узла облучательной установки с многофункциональным петлевым контуром, предназначенной для испытаний топлива АЭС с различными теплоносителями в нештатных условиях.

В результате расчетов получено, что среди рассмотренных вариантов УФН-П оптимальной в отношении достижимого в полости флюенса нейтронов, габаритов сборки и массы топлива, стоимости и управляемости всей установкой является сборка с АЗ из уран-графитового материала с равным 2000 отношением чисел ядер С и ^{235}U , высотой 100 см, полостью диаметром 15 см и графитовым отражателем толщиной 50 см. Эта сборка характеризуется:

- практически однородным радиальным распределением флюенса нейтронов в полости;
- спектром нейтронов, содержащим ~8 % тепловых нейтронов и ~30 % нейтронов с энергией выше 0,1 МэВ;
- внешним радиусом активной зоны 38,5 см;
- загрузкой в АЗ урана 90 %-ного обогащения по ^{235}U 8,28 кг.

Предложенное уменьшение диаметра полости в УФН-П от 30 см до 15 см имеет следствием:

- значительное повышение доминирующей роли реактора БИГР в комплексе, что выражается, в частности, в увеличении флюенса нейтронов за импульс в полости УФН-П при заданном уровне подкритичности сборки;
- уменьшение объема и массы АЗ УФН-П, а также объема и массы всей сборки;
- уменьшение массы обогащенного урана в АЗ УФН-П.

Очень важно также, что достигаемое путем уменьшения диаметра полости повышение доминирующей роли реактора БИГР приведет к упрощению задачи управления установкой, а именно – к снижению жестких требований к ресурсу реактивности органов управления как самого реактора БИГР, так и сборки УФН-П.

Максимальное значение флюенса нейтронов в оптимальной конфигурации УФН-П равняется $1,32 \cdot 10^{16} \text{см}^{-2}$, что примерно на 35 % выше максимального флюенса нейтронов в первоначальной конфигурации УФН-П с полостью диаметром 30 см и отражателем толщиной 50 см. Конфигурация УФН-П с полостью диаметром 15 см и более легким в сравнении с оптимальной сборкой отражателем, т. е. отражателем толщиной 30 см, имеет в сравнении с ней примерно на 15 % меньшее значение флюенса.

Таким образом, в результате выполненной работы получено обоснование возможности создать требуемую лабораторную облучательную установку с флюенсом нейтронов до $1,3 \cdot 10^{16} \text{см}^{-2}$ и длительностью ≥ 90 мс в полости диаметром 15 см и высотой 100 см, с показателем радиальной неравномерности флюенса, не превышающим 10 %.

Список литературы

1. Харитон Ю. Б., Воинов А. М., Колесов В. Ф. и др. Аперiodические исследовательские импульсные реакторы // Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики. – Ленинград: Наука, 1984. С. 103–119.
2. Кувшинов М. И., Колесов В. Ф., Смирнов И. Г. Аперiodический импульсный реактор БИГР // ВАНТ. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки, 1988. Вып. 1. С. 3–12.
3. Колесов В. Ф. Аперiodические импульсные реакторы, т. 1, 2. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007.
4. Avery R. Theory of coupled reactors. – Proceedings of the Second United Nations International Conf. on the peaceful uses of atomic energy, held in Geneva 1–13 Sept. 1958, vol. 12, p. 182–191.
5. Колесов В. Ф., Петров Ю. В., Штарев С. К. Кинетика системы связанных импульсных реакторов // Атомная энергия, 1975, т. 39, вып. 6, с. 392–396.
6. Колесов В. Ф., Штарев С. К. О расчетах переходных процессов в системах связанных импульсных реакторов // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 2, с. 27–47.
7. Снопков А. А., Черашев В. И., Литвин В. И. и др. Протяженный нейтронный источник на базе двухсекционного импульсного реактора БАРС-5 // Материалы международной конференции "Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой". – Обнинск, 1992. Т. 1. С. 144–156.

8. Леваков Б. Г., Лукин А. В., Магда Э. П. и др. Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002.

9. Гулевич А. В., Дьяченко П. П., Зродников А. В., Кухарчук О. Ф. Связанные реакторные системы импульсного действия. – М.: Энергоатомиздат, 2003.

10. Дьяченко П. П., Еловский О. А., Прохоров Ю. А. и др. Реакторно-лазерный комплекс «Стенд Б» // Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 5, с. 337–342.

11. Rubio R. A., Cooper P. J., Schulze J. F. et al. FREC-II: an upgrade to SNL Annular Core Research Reactor. – Trans. Amer. Nucl. Soc., 1989, vol. 59 (Suppl.1), p. 55–56.

12. Донской Е. Н., Ельцов В. А., Житник А. К. и др. Метод Монте-Карло во ВНИИЭФ // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов, 1993, вып. 2. С. 61–64.

13. Васильев А. П., Кандиев Я. З., Читайкин В. И. Расчеты некоторых опытов на системах из ^{235}U и ^{238}U со спектральными нейтронными константами БАС // Нейтронная физика. М.: ЦНИИ-атоминформ, 1984. Т. 2. С. 119–123.

14. Вяткин С. Е., Деев А. Н., Нагорный В. Г. и др. Ядерный графит. – М.: Атомиздат, 1967.

15. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса

нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов, 2011, вып. 1, с. 17–24.

16. Хоружий В. Х. К расчету пространственно-временной кинетики ИЯР и бустера // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1989, вып. 1, с. 3–7.

17. Колесов В. Ф., Интяпина Е. В. Уточненные уравнения динамики импульсного реактора БИГР // Там же, 2010, вып. 2, с. 22–42.

18. Уббеладзе А. Р., Льюис Ф. А. Графит и его кристаллические соединения. – М.: Мир, 1965.

19. Хоружий В. Х., Колесов В. Ф. Решение уравнений многозонной реакторной кинетики с автоматическим выбором шага счета // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1997, вып. 2, с. 22–24.

Контактная информация –

Колесов Владимир Федорович,
главный научный сотрудник ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ

тел. (831 30) 2-75-11, e-mail: kolesov@expd.vniief.ru

Статья поступила в редакцию 31.08.2012.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2012, вып. 3, с. 17–30.