

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
АО «Государственный научный центр Российской Федерации —
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени А. И. ЛЕЙПУНСКОГО»

ФЭИ – 3292

С. М. Бедняков, А. А. Безбородов, Д. А. Клинов,
Г. М. Михайлов, М. Ю. Семенов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НА БФС ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА
БЫСТРОГО РЕАКТОРА**

Обнинск – 2021

УДК 631.039.519.4

С.М. Бедняков, А.А. Безбородов, Д.А. Клинов,
Г.М. Михайлов, М.Ю. Семенов

Моделирование на БФС физического пуска быстрого реактора :

Препринт ФЭИ – 3292. — Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2021. — 15 с.

Стенд БФС предназначен для изучения нейтронно-физических характеристик критсборок, в том числе моделей реакторов на быстрых нейтронах. На БФС может быть апробирована процедура загрузки топлива в активную зону при пуске быстрого реактора с целью обоснования ее ядерной безопасности. На критической сборке с помощью стандартных средств моделирования БФС может быть собрана конфигурация быстрого реактора с минимальной критической массой и измерена эффективность ее систем управления и защиты двумя различными методами с целью повышения надежности измерений. Обосновано моделирование набора критмассы со стартовой загрузкой активной зоны быстрого реактора. Предложена оценка эффективности его органов системы управления и защиты также двумя различными методами. Учтено изменение эффективности органов СУЗ быстрого реактора при переходе от минимальной критической загрузки к стартовой активной зоне. Эффективности органов СУЗ должны соответствовать требованиям по ядерной безопасности к проекту быстрого реактора

Ключевые слова: стенд БФС, реактор на быстрых нейтронах, эффективный коэффициент размножения нейтронов, обратное умножение нейтронов, критическая масса, стартовая загрузка активной зоны реактора, физический пуск реактора, эффективность органов СУЗ.

The BFS facility is designed to study the neutron-physical characteristics of critical assemblies, including models of fast-neutron reactors. At BFS-1, the procedure for loading fuel into the core during fast reactor start-up was tested to justify its nuclear safety. At the critical assembly by means the BFS-1 standard simulation tools may be assembled the fast reactor configuration with a minimum critical mass and measured the effectiveness of its control and protection systems by two different methods in order to increase the reliability of measurements. Next, a set of critical mass with a fast reactor start-up core is simulated. The effectiveness of its control and protection systems was also simulated using two different methods. The evaluation of changes in the efficiency of the fast reactor control and protection systems during the transition from the minimum critical mass to the start-up core took into account. The efficiencies of the controls CPS must comply with the nuclear safety requirements for the fast reactor project

ISBN 978-5-907108-28-8

© АО «Государственный научный центр РФ –
Физико-энергетический институт имени
А. И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»), 2021

Введение

Целью работы является изучение моделирования процесса загрузки топлива на критическом стенде БФС [1] для экспериментального обоснования порционной загрузки ТВС в активную зону быстрого реактора [2] и измерение эффективности его рабочих органов (РО) системы управления и защиты (СУЗ). Загрузка активной зоны реактора от первой ТВС до полностью скомпонованной активной зоны выполняется поэтапно, первый из которых — проведение физического пуска с достижением минимальной критической конфигурации. При обосновании ядерной безопасности быстрого реактора порядок загрузки топлива в его активную зону апробируется на критическом стенде БФС.

В соответствии с принципами и требованиями обеспечения ядерной безопасности, установленными в федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии [3, 4], физические измерения эффективности РО СУЗ необходимы для обоснования требуемых значений подкритичности в режимах кратковременного и длительного остановов и соответствующих запасов реактивности на весь период эксплуатации установки [5]. Моделирование условий реакторных измерений на критическом стенде позволяет повысить надежность получаемых результатов за счет более широких возможностей использования разных методик измерения реактивности, вариации детекторов и их местоположения.

Следующий этап моделирования активной зоны со стартовой критической загрузкой дает экспериментальную оценку изменения эффективности органов СУЗ РУ МБИР при переходе от минимальной критической загрузки к стартовой активной зоне.

Критическая сборка и средства моделирования

На критическом стенде БФС (рис. 1, [6]) для обеспечения условий набора критической массы сборки, согласно правилам формирования макета активной зоны критической сборки, собирается исходная конфигурация, не содержащая делящихся материалов, но по геометрическим характеристикам идентичная расчетным параметрам критической сборки. Расчеты выполняются по программе для ЭВМ MMKKENO [7], которая благодаря специализированному геометрическому модулю с широкими возможностями обладает высоким быстродействием, что позволяет охватывать основные потребности описания компоновок как реакторных установок, так и критическихборок БФС. Расчетное описание экспериментов на сборках БФС в групповом представлении нейтронных сечений основано на системе подготовки групповых констант CONSYST [8].

Целевая активная зона может содержать различные топливные композиции действующих и перспективных реакторных установок на быстрых нейтронах, имитируемые специально подобранными ячейками, содержащими блочки материалов. Теплоносителем является натрий, свинец, свинец-висмут и другие. Также в активной зоне установлены имитаторы экспериментальных устройств (ЭУ) и макеты органов («гильз») СУЗ. Активная зона при моделировании реакторов — цилиндризованная гексагональная матрица из стальных или алюминиевых труб диаметром 50 мм, загруженных блочками делящихся, воспроизводящих, конструкционных материалов с вытеснителями из стали, алюминия или полиэтилена в межтрубных зазорах (или без вытеснителей в межтрубных зазорах) [1].

Отражатели (экраны) торцевые и боковые — сборка из стальных или алюминиевых труб диаметром 50 мм вокруг активной зоны, загруженных блочками металлического обедненного урана и (или) тория, и (или) двуокиси обедненного урана, и (или) монокрида обеднённого урана, стали, хрома, циркония, алюминия, меди, окиси алюминия, натрия, свинца, свинцово-висмутового сплава, графита, карбида бора (в виде блочков или порошка) [1].

В направлении металлической колонны стенда БФС от периферии стального отражателя может формироваться стальной «коридор» из зон, характеризующихся различными типами стальных конструкционных

элементов БФС, для моделирования канала в направлении блока ионизационных камер, имитирующих датчики нейтронных потоков ближних подвесок быстрого реактора.

Традиционно все формируемые при наборе критической массы штатные органы СУЗ стенда БФС имеют тот же самый состав, что и стержни тех зон критсборки, в которых они находятся.

Детекторы, сигнал от которых поступает к цифровому реактиметру, расположены в шести экспериментальных каналах: три токовых канала с камерами КНК-56 и три импульсных канала со счетчиками СНМ-18, окруженных заполненными полиэтиленом трубами. Трубы с полиэтиленом необходимы в обеспечение требований, предъявляемых эксплуатационным и экспериментальным оборудованием, к эффективности регистрации нейтронов и предельным значениям загрузки по каналам регистрации нейтронов.

Набор минимальной критической массы

Параметры критичности определенной расчетом конфигурации получают в результате регламентированного вывода собираемой сборки в критическое состояние. До загрузки тепловых стержней (ТС) в активную зону, заполненную макетами ТС, в трубу центрального канала устанавливается пусковой источник нейтронов соответствующей интенсивности [9]. Загрузка ТС в активную зону сопровождается построением кривых обратного счета по показаниям трех штатных импульсных каналов контроля плотности потока нейтронов стенда БФС. Первая порция загружаемых ТС не превышает 10% [9] от расчетного количества ТС, соответствующего критическому состоянию. Вторая порция загружается после снятия показаний приборов контроля плотности потока нейтронов и не превышает первую. После этого методом экстраполяции в нулевое значение обратного счета по кривой обратного счета выполняется первая оценка критической загрузки. Каждая последующая порция загружаемых ТС не должна превышать $\frac{1}{4}$ величины оставшегося до минимального экстраполируемого по кривой обратного счета значения количества ТС, соответствующего критическому состоянию.

Процедура набора критмассы сборки выполняется таким образом, чтобы на ее основе можно было интерпретировать процедуру набора критмассы модели быстрого реактора (рис. 2, [10]), где каждый макет

ТВС моделируется несколькими ТС сборки БФС согласно известным шагам решетки. Для осуществления контроля за физическим пуском в корпус реактора помещаются датчики контрольно-измерительной аппаратуры. Поскольку диапазон изменения плотности потока нейтронов в процессе физического пуска реактора достигает нескольких порядков, используется последовательный метод регистрации плотности потока нейтронов: в начале загрузки с помощью импульсной аппаратуры, датчиками которой являются пропорциональные счетчики нейтронов или импульсные камеры деления, а затем с использованием токовой аппаратуры, датчиками которой являются ионизационные камеры. В соответствии с этим, одновременно с построением кривых обратного умножения на основе показаний штатных нейтронных счетчиков стенда БФС, строятся кривые обратного умножения на основе нейтронных счетчиков, расположенных в металлической колонне стенда и моделирующих блок регистрации нейтронов быстрого реактора (счетчик нейтронов СНМ-18 и камера КНТ-54 в импульсном режиме). Эти детекторы находятся примерно на таком же расстоянии от центра активной зоны БФС, как и ближние подвески от центра активной зоны моделируемого реактора.

Последовательные порции загрузки ТС для сборки БФС и ТВС для моделируемого реактора следует выбирать таким образом, чтобы не возникало противоречий правилам ядерной безопасности и в одном и в другом случае одновременно.

При достижении $K_{эфф} \sim 0,98$ (коэффициент умножения нейтронов ~ 50) согласно НП-008-16 [9] проводится поочередная оценка эффективности всех рабочих органов СУЗ и проверка наличия (отсутствия) критического состояния при введении всех рабочих органов СУЗ БФС.

Дальнейшая загрузка и последующий выход в критическое состояние осуществляется при выведенных органах компенсации реактивности (КР) и автоматизированного регулирования (АР) следующим образом: выполняется запланированная недистанционная догрузка ТС, затем персонал покидает помещение критической сборки, после чего производится регламентированное пошаговое увеличение реактивности с помощью рабочих органов КР и АР до выхода сборки в критическое состояние. Если критическое состояние не достигается, органы КР

и АР выводятся из активной зоны и предыдущие операции повторяются до его достижения.

Набор стартовой критической массы

В соответствии с вышеизложенной процедурой производится подбор по количеству ТС БФС до критического состояния сборки связанный с функциональными характеристиками органов СУЗ моделируемого реактора. Как правило, органы аварийной защиты (АЗ) и компенсирующие стержни (КС) находятся во взведенном состоянии. Органы АЗ отвечают за быстрый останов реактора, вторые используются для плавного регулирования состояния критичности реактора. Органы ручного регулирования (РР) могут использоваться при разогреве первого контура реактора.

Так, при физическом пуске реактора на быстрых нейтронах БН-800 (рис. 3, [11]) 30 августа 2013 года завершили сборку БН-800 с имитационной активной зоной. 2 февраля 2014 года стартовала загрузка в реактор тепловыделяющих сборок, завершившаяся 23 июля. За два дня до этого количество топлива, загруженного в реактор БН-800, достигло значения, достаточного для начала цепной ядерной реакции. 27 июня 2014 года был осуществлен выход на минимально контролируемый уровень мощности (МКУ) — была достигнута мощность 0,01 % от номинала (рис. 4), на которой реактор удерживался длительное время [12]. Стартовая активная зона реактора содержала пусковой источник нейтронов, 648 тепловыделяющих сборок, 36 сборок, участвующих в различных системах управления и защиты [11].

В октябре 2016 года старейший американский журнал по энергетике «POWER» присудил четвёртому энергоблоку Белоярской АЭС с реактором БН-800 премию «Power Awards» за 2016 год в номинации «Лучшие станции» в мире [13].

Положение и состав макетов органов СУЗ реактора в активной зоне со стартовой критической загрузкой моделируется стандартными средствами стенда БФС так же, как и при наборе минимальной критической массы.



Рис. 1а. Стенд БФС-1

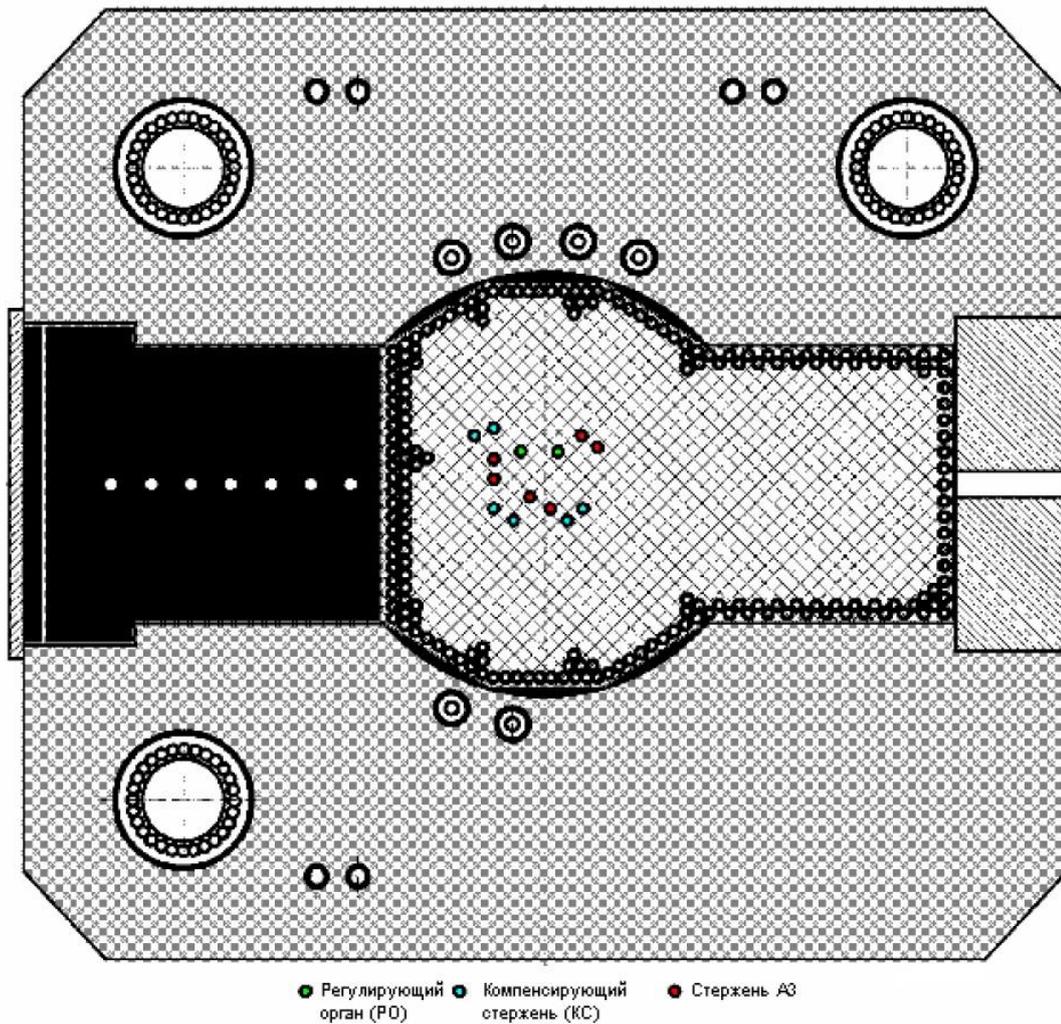


Рис. 1б. Схема стенда БФС-1

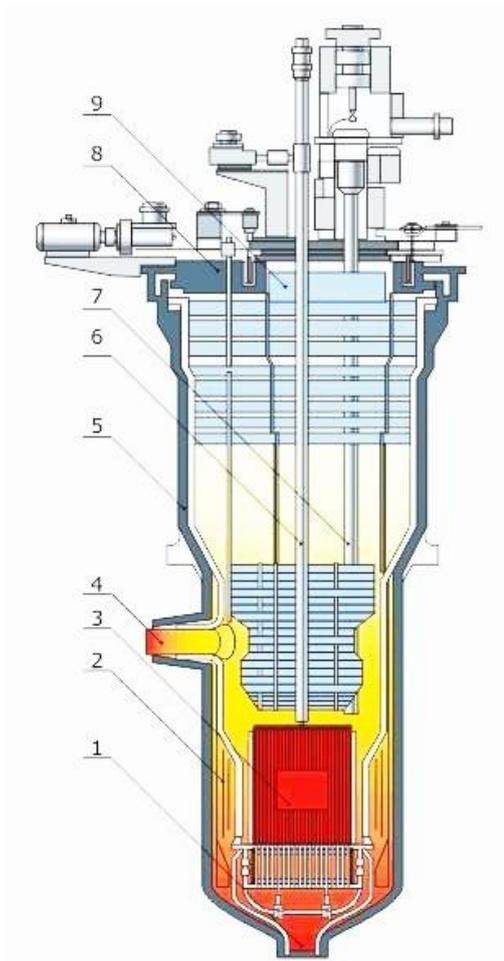


Рис. 2а. Схема реактора БОР-60 (3 – активная зона)

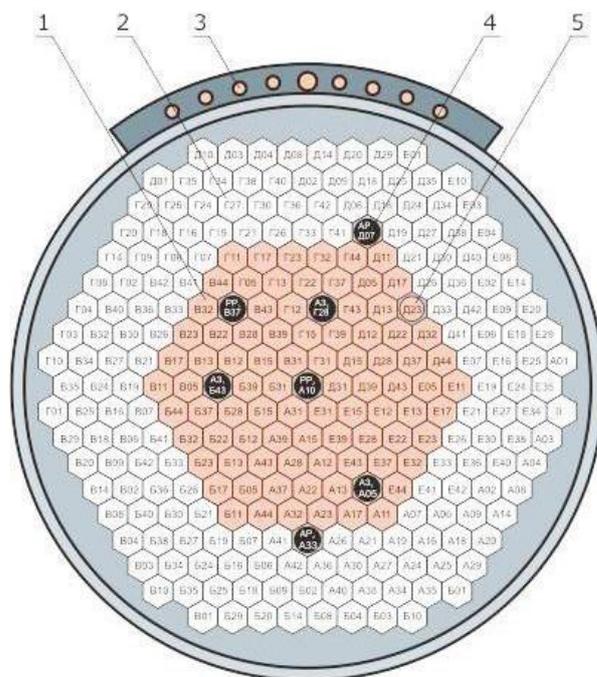


Рис. 2б. Компоновка активной зоны макета БОР-60
(1 – тепловыделяющие сборки)



Рис. 3. Блок № 4 БАЭС [13]

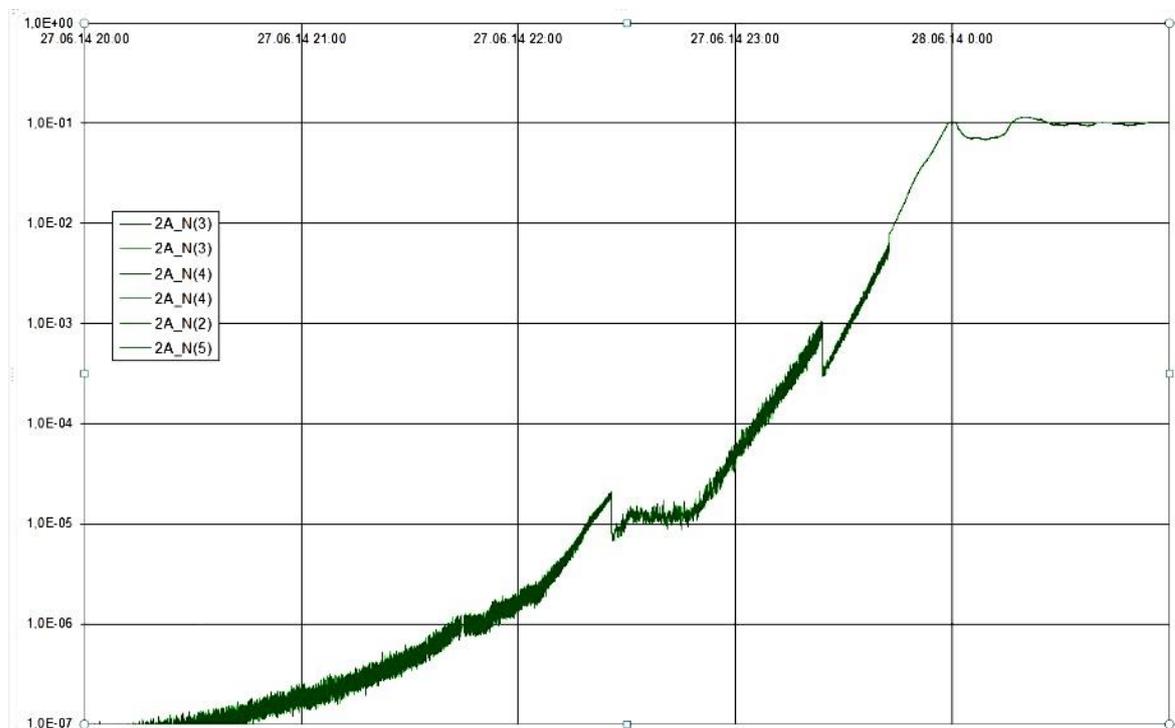


Рис. 4. График мощности реактора БН-800 [12]

Измерение эффективности органов СУЗ быстрого реактора в модели активной зоны сборки БФС

Измерение эффективности макетов РО СУЗ может выполняться двумя методами: методом «разгон — сброс» [14, 15] с использованием обращенного решения уравнений кинетики (ОРУК [16]) и методом обратного умножения (МОУ [17, 18]).

Макет каждого органа СУЗ состоит из нескольких стержней и моделирует состояние органа СУЗ, полностью погруженного в реактор.

При измерении по методу «разгон — сброс» макет органа СУЗ, состоящий из одного (АР) или двух (РР, КР, АЗ) стержней, с помощью мостового крана поднимается на необходимую для измерения его эффективности высоту (то есть в положение, когда нижняя граница зоны поглотителя в макете находится примерно на уровне верхней границы топлива в ТС).

Далее поднятием всех РО СУЗ на верхний концевик (ВК) сборка выводится в надкритическое состояние («разгон», то есть увеличение нейтронной мощности сборки).

После этого по достижении определенного уровня мощности макет органа СУЗ опускается вниз до упора в дистанционирующую плиту («сброс», то есть снижение мощности сборки).

Эффективность макета органа СУЗ вычисляется по формуле: $\Delta\rho = |\rho^- - \rho^+|$, где ρ^+ – реактивность системы при разгоне, а ρ^- – реактивность системы при сбросе мощности. Эффективности макетов, измеренные при помощи штатного комплекта ионизационных камер стенда БФС-1 (КНК-56) и камеры (КНК-15), моделирующей БИК быстрого реактора, рассматриваются отдельно.

Величины погрешностей, возникающих при измерениях реактивности методом ОРУК, изучались ранее, в том числе и при измерениях эффективности органов регулирования и защиты реактора БН-800 [19]. Они составляют: $\pm 3\%$ для реактивности в диапазоне от $+0,3 \beta_{эф}$ до $-0,7 \beta_{эф}$; $\pm 7\%$ для реактивности до $-5,0 \beta_{эф}$; $\pm 15\%$ для реактивности до $-10 \beta_{эф}$. При переходе через границы диапазонов погрешности изменяются плавно, достигая максимальных значений внутри диапазона на границе с более глубокой подкритичностью.

При измерениях эффективности макетов органов СУЗ, помимо метода ОРУК, используется также метод обратного умножения (МОУ), широко применяемый во многих организациях по всему миру.

МОУ позволяет вычислить значение реактивности (в приближении «точечной» модели кинетики) из показаний ионизационных камер для известного («реперного») подкритического состояния и измеряемого тем самым подкритического состояния реактора.

Полная погрешность измерения реактивности методом ОУ находится в диапазоне от $\pm 3\%$ до $\pm 10\%$.

Для измерения эффективности макетов РО СУЗ быстрого реактора используются детекторы, размещенные в металлической колонне, — камеры деления КНТ-54 и КНК-15. Гелиевый счетчик нейтронов СНМ-18 используется для контроля показаний КНТ-54 при измерениях в условиях глубокой подкритичности при малых скоростях счета камеры деления. Детекторы КНТ-54 и СНМ-18 работают в импульсном режиме. Кроме того, записываются показания детектора-реактиметра борной камеры КНК-56, размещенной в первом канале тепловой колонны вблизи стенки бака критической сборки для контроля показаний КНТ-54 при больших скоростях счета в случае малых величин подкритичности.

Ранее полученные результаты измерений обоими методами хорошо согласуются в пределах заявленной погрешности измерения.

Результаты измерений эффективности органов СУЗ должны соответствовать:

1) требованиям ПБЯ ИР (НП-009-17) [4]:

Раздел III. Требования к проекту исследовательского реактора, направленные на обеспечение ядерной безопасности. Пункт 12:

а) «подкритичность реактора при введенных всех РО СУЗ — не менее 2% ($K_{эфф} \leq 0,98$) на любой момент кампании реактора»;

б) «подкритичность реактора в режиме длительного останова — не менее 5% ($K_{эфф} \leq 0,95$)».

2) требованиям ПБЯ РУ атомных станций (НП-082-07) [5]:

Пункт 2.3.3. Управление нейтронным потоком и реактивностью.

2.3.3.15. Перед пуском реактора рабочие органы АЗ должны быть взведены в рабочее положение.

Подкритичность реактора в любой момент кампании после взведения рабочих органов АЗ в рабочее положение с введенными в активную

зону остальными органами СУЗ должна быть не менее 0,01 в состоянии активной зоны с максимальным эффективным коэффициентом размножения.

Заключение

Работы на стенде БФС по моделированию физического пуска реактора на быстрых нейтронах выполняются в несколько этапов.

На критическом стенде БФС может быть собран макет критической сборки, моделирующий активную зону, отражатель, частично корпус и закорпусную периферию быстрого реактора в исходном перед физическим пуском состоянии, когда в активную зону загружены макеты ТС до установки пускового источника нейтронов.

В соответствии с методикой набора неизвестной критмассы [9] выполняется процесс порционной загрузки условных ТВС в активную зону до достижения минимальной критической конфигурации с построением кривых обратного умножения и оценкой значений подкритичности для обеспечения ядерной безопасности на каждом шаге загрузки топлива. С демонстрацией при этом безопасного хода кривых по нескольким детекторам.

На модели активной зоны реактора на быстрых нейтронах с минимальной критической конфигурацией выполняются измерения эффективности макетов одиночных органов АЗ, КР, РР, АР, систем органов и сумм систем органов. Для измерений используются два метода измерений: метод «разгон-сброс» с вычислением реактивности путем решения обращенного уравнения кинетики и метод обратного умножения. Результаты измерений двумя методами, а не одним, повышает в итоге оценку их достоверности.

Выполняется процесс загрузки топлива в активную зону до достижения стартовой критической конфигурации. Проводятся измерения эффективности макетов одиночных и систем органов СУЗ. Дается экспериментальная оценка изменения эффективности органов СУЗ реакторной установки при переходе от минимальной критической загрузки к стартовой активной зоне.

На основании полученных экспериментальных данных проверяется соответствие эффективности системы органов управления и защиты моделируемого быстрого реактора нормам и правилам ядерной безопасности.

Список литературы

1. Казанский Ю.А., Дулин В.А., Зиновьев В.П. и др. Методы изучения реакторных характеристик на критических сборках БФС. – М.: Атомиздат, 1977. – 88 с.

2. Клинов Д.А., Гулевич А.В., Каграманян В.С. и др. Вызовы и стимулы развития быстрых натриевых реакторов в современных условиях. // Атомная энергия. – 2018. – Т. 125. – Вып. 5. – С. 131–136.

3. НП-033-11 «Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок». – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2011. – 53 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293796/4293796209.htm>

4. НП-009-17 «Правила ядерной безопасности исследовательских реакторов». – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2017. – 44 с. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201708310015?index=45&rangeSize=1>

5. НП-082-07 «Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций». – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2007. – 26 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/548/4293835628.pdf>

6. Polyakov A.J., Bednyakov S.M. Application of experimental database for BFS critical test stands // Proc. of the Symp. Dysnai, Ignalina Youth Nuclear Association, July 02, 2002, Visaginas, Lithuania. – P. 111–121.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014610575 Российская Федерация. ММККЕНО / Блыскавка А.А., Коробейников В.В., Кощев В.Н., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Полевой В.Б., Раскач К.Ф., Рожихин Е.В., Семенов М.Ю., Цибуля А.М. – Дата регистрации 15.01.2014.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612298 Российская Федерация. CONSYST / Кощев В.Н.,

Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Семенов М.Ю., Цибуля А.М. – Дата регистрации 21.02.2013.

9. НП-008-16 «Правила ядерной безопасности критических стендов». — М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2016. – 39 с.

URL: <http://docs.cntd.ru/document/420376475>.

10. НИИАР БОР-60. URL:

<http://www.niiar.ru/sites/default/files/bor60>

11. Долгая дорога «Прометея»: история быстрого реактора БН-800. URL: <https://strana-rosatom.ru/2020/10/29/долгая-дорога-прометея-история-быс/>

12. БН-800 – успешный пуск. URL:

<http://www.atominfo.ru/newsi/p0432.htm>

13. Russian Fast Reactor Connected to the Grid. POWER. November 1, 2016. URL: <https://www.powermag.com/beloyarsk-nuclear-power-plant-unit-4-sverdlovsk-oblast-russia/?printmode=1>

14. Грачев А.В., Канунников Ю.С., Калабухов Ю.С. и др. Цифровой реактиметр для ядерных реакторов // Атомная энергия. – 1986. – Т. 61. – Вып. 2. – С. 110–112.

15. Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Экспериментальная физика реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 352 с.

16. Бриккер И.Н. Обращенное решение уравнений кинетики ядерного реактора // Атомная энергия. – 1966. – Т. 21. – Вып. 1. – С. 9-13.

17. Стюарт Х.Б., Ла-Виолетт Ф.Дж., Кригер Т.Дж. Методика обратного размножения в сборке / В кн.: Физика промежуточных реакторов / Пер. с английского. – М.: Атомиздат, 1961. – С. 66–82.

18. Hogan W.S. Negative reactivity measurements // Nuclear Science and Engineering. – 1960. – V. 8, iss. 6. – P. 518–522.

19. А.А. Камаев, D.A. Klinov, G.M. Mikhailov., et al., Calculation and experimental analysis of the BN-800 reactor core neutronic parameters at the stage of reaching first criticality followed by rated power testing. – IAEA-CN245-462. P. 1–9.

Подписано к печати 06.04.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 0,6. Уч.-изд. л. 0,75.
Тираж 48 экз. Заказ № 61.

Отпечатано в ОПиНТИ методом прямого репродуцирования с оригинала авторов.
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.
АО «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»