

## АБСОЛЮТИЗАЦИЯ УРОВНЕЙ ПОДКРИТИЧНОСТИ, ИЗМЕРЯЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДИКИ РАЗМНОЖЕНИЯ НЕЙТРОНОВ ИСТОЧНИКА И МЕТОДИКИ ПЛОЩАДЕЙ

**В. Ф. Колесов**

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

Статья поступила в редакцию 04.07.2019, после доработки – 09.08.2019, принята к публикации – 04.10.2019

Рассмотрены версии методики размножения нейтронов источника, использующей реактивность «референс»-уровня, разработанной в зарубежных институтах в целях определения реактивности глубоко подкритичных реакторов. Обсуждены также результаты использования в указанной методике и в методике площадей способа расчетного моделирования эксперимента, позволяющего получать достаточно точные данные и без привлечения «референс»-уровня. Обоснована целесообразность использования способа расчетного моделирования эксперимента в версиях методики размножения нейтронов источника, применяемых в ряде институтов России в процедуре критмассовых измерений.

**Ключевые слова:** реактивность, реактор, критическая сборка, размножающая система, методика размножения нейтронов источника, методика площадей, способ расчетного моделирования эксперимента, критмассовые измерения.

**ABSOLUTIZATION OF SUPERCRITICALITY LEVELS MEASURED WITH THE AID OF TECHNIQUE OF SOURCE NEUTRONS MULTIPLICATION AND METHOD OF SQUARES / V. F. KOLESOV** // There are considered different versions of the technique of source neutrons multiplication taking advantage of reactivity of «reference» level that was developed in the foreign institutes in order to determine reactivity of deeply subcritical reactors. The results of using in the above-specified technique and in the method of squares of the experiment calculated simulation of experiment making it possible to get sufficiently precise data with no «reference» level involved are discussed. The expedience of using the method of the experiment calculated simulation in the versions of the source neutrons multiplication technique applied in some institutes of Russia in the procedure of critical mass experiments is conditioned.

**Key words:** reactivity, reactor, critical assembly, multiplying system, technique of source neutrons multiplication, method of squares, method of experiment calculated simulation, critical mass measurements.

### Введение

Реактивность, подкритичность, как и родственное им, но более первичное понятие эффективного коэффициента размножения нейтронов  $k_{эф}$ , относятся к разряду наиболее важных характеристик ядерных реакторов. Трудно, например, представить, чтобы обсуж-

дение и решение конкретных задач по управлению или безопасности реактора проводилось без использования этих понятий. Значения реактивности, подкритичности или  $k_{эф}$  являются главными показателями состояния размножающей системы. В этой связи большее значение приобрели методики и точность измерения (правильнее говорить: ме-

тодики экспериментального определения) реактивности.

В практике экспериментального определения реактивности широко известны методики импульсного источника, методика площадей (методика Шестранда), методика сброса стержня, стохастические методики Фейнмана и  $\alpha$ -Росси, а также методика обращенного решения уравнений кинетики [1].

Измерительные операции методики сброса стержня и родственной ей методики обращенного решения уравнений кинетики вследствие перемещения стержня сопровождаются заметными изменениями конфигурации активной зоны (АЗ) реактора. Изменения конфигурации АЗ, в свою очередь, приводят к деформации пространственного и энергетического распределений плотности потока нейтронов и, следовательно, к изменениям эффективностей источника нейтронов и нейтронного детектора. Методике размножения нейтронов источника (РНИ) уже изначально свойственно вредное для нее отличие пространственного и энергетического распределений потока нейтронов, создаваемых реактором и источником. Указанные явления неизбежно сказываются на точности измерения реактивности. Хотя и в меньшей степени, пространственно-энергетические эффекты проявляются и в других, более благополучных, методиках.

Отрицательное воздействие на точность измерения реактивности оказывают также отклонения реальных условий проведения измерений от требований методологии эксперимента, например, выход измерительной процедуры за пределы области действия точечной модели кинетики.

В работе [2], например, детально исследована применимость методик импульсного источника нейтронов и отношения площадей (Шестранда) к установке Ялина – резко гетерогенной быстротепловой подкритической реакторной системе. Прослежены сильные и слабые стороны методики Шестранда, считающейся одной из наиболее реалистичных методик для калибровки реактивности в электроядерных установках (ЭЛЯУ). Показано, что в такой, как Ялина, сильно гетерогенной системе оценки реактивности по методике

Шестранда могут отличаться в два раза в зависимости от места расположения детектора.

Как это следует из ряда опубликованных статей [2–4] и доводов логики вообще, неточность измеренной реактивности, обусловленная указанными выше факторами, может быть успешно скорректирована на основе выполнения с помощью программ Монте-Карло параллельного эксперименту расчетного моделирования измерительных операций. Расчетное моделирование эксперимента в данном случае требуется единственно лишь для определения коэффициента коррекции, который для случаев расчетного моделирования эксперимента и самого эксперимента предполагается одинаковым. Несмотря на использование расчетного коэффициента коррекции, итоговое, уже скорректированное значение реактивности резонно рассматривается как величина экспериментальная.

Этого рода подход к задаче корректирования измеренной реактивности, прежде всего, применяется в методике размножения нейтронов источника [3, 4]. Он оказывается полезным и в других методиках измерения реактивности, даже в весьма точной методике площадей (Шестранда) [2], когда она применяется к глубоко подкритичным реакторам с резко выраженной гетерогенностью и проявлением эффектов каскадности. Справедливость последнего замечания следует, например, из результатов измерения с помощью методики Шестранда реактивности глубоко подкритичных конфигураций установки Ялина. Показано, что и в этом случае путем введения расчетных корректирующих множителей можно достигнуть, по-существу, полной ликвидации разброса результатов. По мнению автора настоящей статьи, указанный подход, в принципе, может найти применение и в других случаях реабилитации заведомо приближенного результата измерений реактивности (и не только реактивности).

Статья содержит результаты изучения нескольких версий методики РНИ, применяемых в ряде зарубежных институтов в целях измерения реактивности глубоко подкритичных реакторных систем и использующих или тщательно измеренную другими методиками

реактивность референс-уровня, или просто расчетный корректирующий множитель. Последний из этих подходов назван здесь способом расчетного моделирования эксперимента (РМЭ). Применение способа РМЭ позволяет достигать успешного результата без использования реактивности референс-уровня, при этом не только в методике РНИ, но и в методике Шестранда.

Статья содержит также выполненное на основе указанного изучения зарубежных работ обоснование целесообразности использования способа РМЭ в версиях методики РНИ, применяемых рядом институтов России в процедуре критмассовых измерений. Применение способа РМЭ в версиях методики РНИ, используемых в институтах России, позволит создать на их базе эффективный измеритель абсолютной реактивности размножающих систем, в том числе систем глубоко подкритичных, с большими размерами, сложной гетерогенной структурой АЗ и даже с эффектами каскадности. Реализация указанного измерителя реактивности не будет связана с ограничениями в отношении присутствия макетной сборки, места расположения источника нейтронов и спектра этих нейтронов. Реактиметра, подобного указанному здесь измерителю реактивности, в настоящее время в России нет.

В зарубежных публикациях методика размножения нейтронов источника называется методикой NSM (Neutron Source Multiplication). Версии ее называются методиками ASM (Amplified Source Multiplication) и MSM (Modified Source Multiplication).

## 1. Корректирующие множители в методике размножения нейтронов источника

Методика NSM определения уровня подкритичности с помощью измерения коэффициента умножения нейтронного источника известна с 40-х годов прошлого века, однако простота и наглядность позволяют ей до сих пор успешно конкурировать с другими методиками.

В элементарном представлении методика размножения нейтронов источника (NSM) базируется на соотношении

$$M = \varepsilon(S_0 + k_{\text{эф}}S_0 + k_{\text{эф}}^2S_0 + \dots) = \frac{\varepsilon S_0}{1 - k_{\text{эф}}}, \quad (1)$$

где  $M$  – интенсивность отсчетов нейтронов детектором;  $\varepsilon$  – эффективность детектора;  $S_0$  – интенсивность внешнего источника нейтронов.

При грубом подходе коэффициент размножения нейтронов  $k_{\text{эф}}$  и реактивность  $(k_{\text{эф}} - 1)/k_{\text{эф}}$  реактора могут быть определены непосредственно по формуле (1). Однако идеализированная ситуация, отраженная в этой формуле, в реальных условиях не всегда справедлива. Формула (1) неявно предполагает, что пространственно-энергетическое и угловое распределения плотности потока нейтронов в реакторе и нейтронов источника имеют форму фундаментальной гармоники уравнения переноса и эта форма сохраняется неизменной при любой подкритичности.

На самом деле распределения нейтронов реактора и тем более нейтронов источника содержат не только компоненты в форме фундаментальной гармоники, но и компоненты в форме высоких гармоник. Источник нейтронов может быть даже точечным. С уменьшением  $k_{\text{эф}}$  вклад источника в полный поток нейтронов становится все более значительным, и более весомым становится вклад высоких гармоник. По этим (но не только по этим) причинам полное распределение нейтронов в реакторе отличается от распределения нейтронов источника.

В целях преодоления указанного осложнения было предложено несколько модифицированных вариантов методики NSM, получивших название методики MSM (Modified Source Multiplication). Модификации методики заключались в проведении сопутствующих измерениям численных расчетов задач переноса нейтронов: задач на собственные значения и задач с фиксированным источником. С помощью этих расчетов определялся коэффициент коррекции результата измерений, учитывающий влияние пространственно-энергетических эффектов.

В одной из ранних работ по методике MSM – в докладе [5] (см. также статью [6]) –

определяемая по формуле (1) реактивность корректировалась с помощью коэффициентов  $f_s$  и  $f_\varepsilon$ . Коэффициент  $f_s$  позволяет учитывать эффекты, связанные с возмущением поля ценности нейтронов при изменении реактивности. Коэффициент  $f_\varepsilon$  корректирует пространственные эффекты, обусловленные гетерогенными возмущениями во вкладе в реактивность и пространственной неоднородностью внешнего источника нейтронов. Эти коэффициенты определяют из решений уравнений переноса нейтронов.

Доклад [5] опубликован на японском языке, недоступном для автора настоящей статьи, поэтому здесь нет возможностей для более подробного изложения разработанной в докладе версии MSM. Однако ряд последующих версий MSM может быть представлен здесь более подробно. Первая из этих разработок, названная методом MSM с извлечением фундаментальной моды, изложена в статье [6].

### 1.1. Метод MSM с извлечением фундаментальной моды

Авторы статьи [6] резонно полагают, что понятие  $k_{эф}$  связано с размножением нейтронов в фундаментальной моде, поэтому корректное определение подкритичности должно проводиться с извлечением из массива измеренных данных компонента фундаментальной моды. При этом утверждается, однако, что коррекция, основанная только на извлечении фундаментальной моды, может в некоторых случаях оказаться недостаточной. Это будет наблюдаться, если большая реактивность добавляется в систему локально, вследствие этого сильно изменяется пространственно-энергетическое распределение самой фундаментальной моды, а также ценности нейтронов в системе. Пространственно-энергетические эффекты, возбуждаемые указанным возмущением, также должны быть скорректированы.

В соответствии со сказанным, в статье [6] предложена версия метода MSM, включающая операцию извлечения фундаментальной моды из массива измеренных данных и коррекцию, устраняющую влияние эффектов, вносимых

возмущением фундаментальной моды и ценности нейтронов. По мнению авторов этой версии метода MSM, она способна с хорошей точностью оценивать подкритичность реактора даже в случаях локального внесения большой реактивности.

Главной целью авторов статьи [6] было теоретическое обоснование предложенной версии методики MSM, что и было выполнено на базе  $G$ -групповой диффузионной теории.

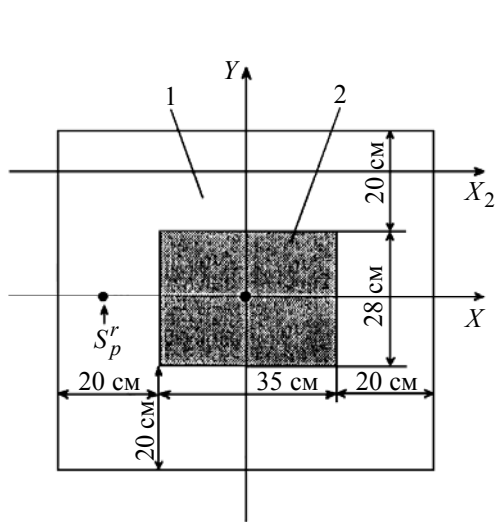
В результате формальной записи решений для потока нейтронов и сопряженного потока, разложения потока нейтронов по собственным функциям задачи, а также выполнения ряда других операций, было получено, что реактивность  $\rho_l$   $l$ -го уровня может быть определена по тщательно измеренной реактивности  $\rho_{ref}$  референс-уровня с помощью следующей формулы:

$$\rho_l = C_l^{im} C_l^{sp} C_l^{ext} \left( \frac{1}{Q_l} \right) \rho_{ref}, \quad (2)$$

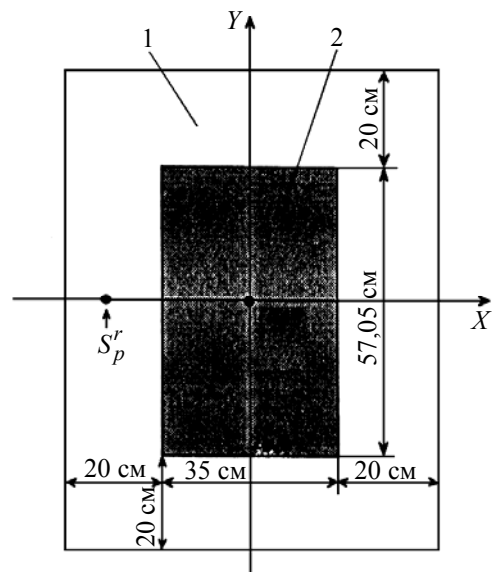
где  $Q_l$  – параметр размножения нейтронных отсчетов в  $l$ -м подкритическом состоянии,  $C_l^{im}, C_l^{sp}, C_l^{ext}$  – корректирующие коэффициенты. Коэффициент  $C_l^{ext}$  относится к операции извлечения фундаментальной моды,  $C_l^{im}$  корректирует эффект, индуцируемый возмущением поля нейтронной ценности,  $C_l^{sp}$  корректирует пространственный эффект, связанный с возмущением фундаментальной моды.

В целях проверки осуществимости предложенной версии MSM в работе [6] проведена численная (иными словами, бумажная) верификация метода. Эта верификация выполнена на примере небольшой, замедляемой обычной водой критической сборки KUKA в университете Киото в Японии (рис. 1) [7].

Активная зона сборки KUKA представляет собой параллелепипед шириной 35 см (ось  $x$ ), глубиной 28 см (ось  $y$ ) и высотой 57,05 см (ось  $z$ ). Толщина отражателя в направлениях  $x, y, z$  равна 20 см. Начало координат на рис. 1 совпадает с центром АЗ; позиции в реакторе определяются указанием координат  $(x, y, z)$ .



Горизонтальное сечение АЗ при  $Z = 0$



Вертикальное сечение АЗ при  $Y = 0$

Рис. 1. Конфигурация критической сборки KUKA [7]:  $S_p^r$ ,  $S_p^c$  – точечные нейтронные источники, расположенные в отражателе и в центре АЗ соответственно; 1 – отражатель; 2 – АЗ

Подкритичность сборки изменялась однородным способом в результате наращивания числа топливных пластин без изменения размеров АЗ. Это означает, что топливные шаги в АЗ с разными подкритичностями были неодинаковыми. Числа топливных пластин равнялись 210, 240 и 310, соответствующие АЗ назывались С210, С240 и С310. Коэффициент размножения нейтронов  $k_{эф}$  в этих АЗ равнялся 0,92201; 0,95219 и 0,99429 соответственно.

Задача с фиксированным источником рассчитывалась со следующими конкретными источниками:

- 1)  $S_h$  – однородно распределенный в АЗ, генерируемый самим топливным материалом источник нейтронов;
- 2)  $S_p^c$  – точечный источник, расположенный в центре АЗ, т. е. в точке с координатами  $(0, 0, 0)$ ;
- 3)  $S_p^r$  – точечный источник, расположенный в отражателе, а именно в точке с координатами  $(-28, 0, 0)$ .

ь получаются путем расчета взвешивались так, что интегралы от них по всему объему реактора равнялись единице. В качестве сборки «референс» была принята конфигурация реактора С210.

При верификации оцененные по бумажной версии MSM подкритичности  $(1 - k_{эф})/k_{эф}$  сравнивались с их истинными значениями, в качестве которых были приняты подкритичности, определенные путем численного решения многогрупповых диффузионных уравнений реактора.

Результаты сравнения истинной подкритичности с ее значениями, оцененными:

- с выделением фундаментальной гармоники и с введением коррекций на возмущения;
- без выделения фундаментальной гармоники, но с введением коррекций на возмущения;
- по формуле (1), т. е. без выделения фундаментальной гармоники и без введения коррекций на возмущения, представлены на рис. 2–4. Все данные рис. 2–4 приводятся в зависимости от места расположения на оси  $x$  детектора нейтронов. Линии с символами представляют оцененные величины, а линии без них – истинные (теоретические) величины.

Как видно по рис. 2–4, в случае, когда обработка данных проводится с выделением фундаментальной гармоники и введением коррекций на возмущения, оцененные уровни подкритичности хорошо согласуются с истинными (теоретическими) уровнями, независимо

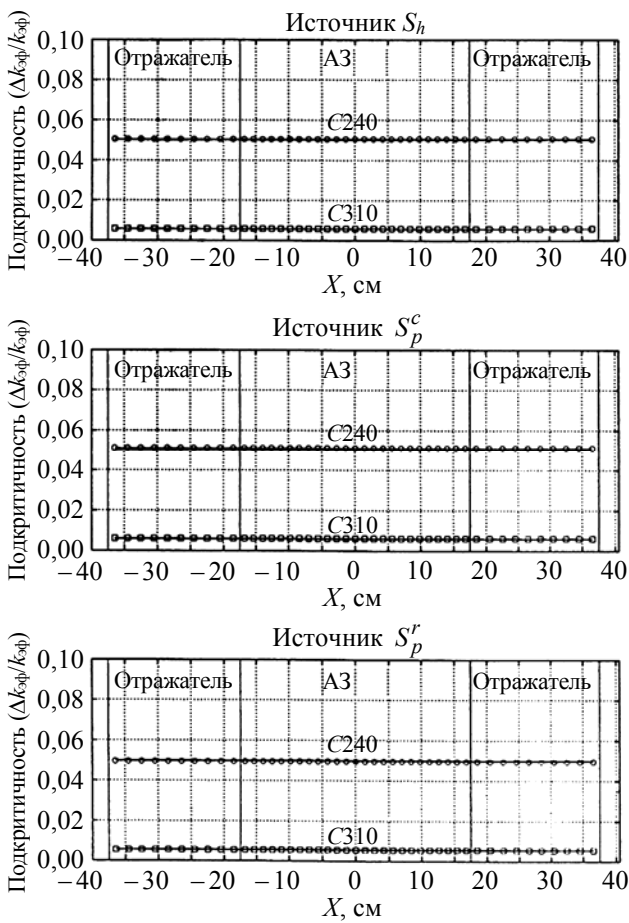


Рис. 2. Подкритичности истинные (—) и оцененные (линии с символами) с помощью модифицированной методики MSM

от типа источника нейтронов и позиции детектора. Другие данные работы [6] свидетельствуют, что в случае симметричных источников  $S_h$  и  $S_p^c$  и расположенного в отражателе детектора подкритичность может быть оценена с относительно высокой точностью даже без выделения фундаментальной гармоники и без введения коррекций на возмущения, т. е. непосредственно по формуле (1). Этот факт может быть приписан доминирующей роли фундаментальной гармоники в случае симметричного источника и гомогенному (однородному) характеру добавления реактивности.

В случае асимметричного источника нейтронов  $S_p^r$ , подкритичность, оцененная без выделения фундаментальной гармоники и без введения коррекций на возмущения, сильно зависит от позиции детектора. Если детектор расположен вблизи источника и ни-

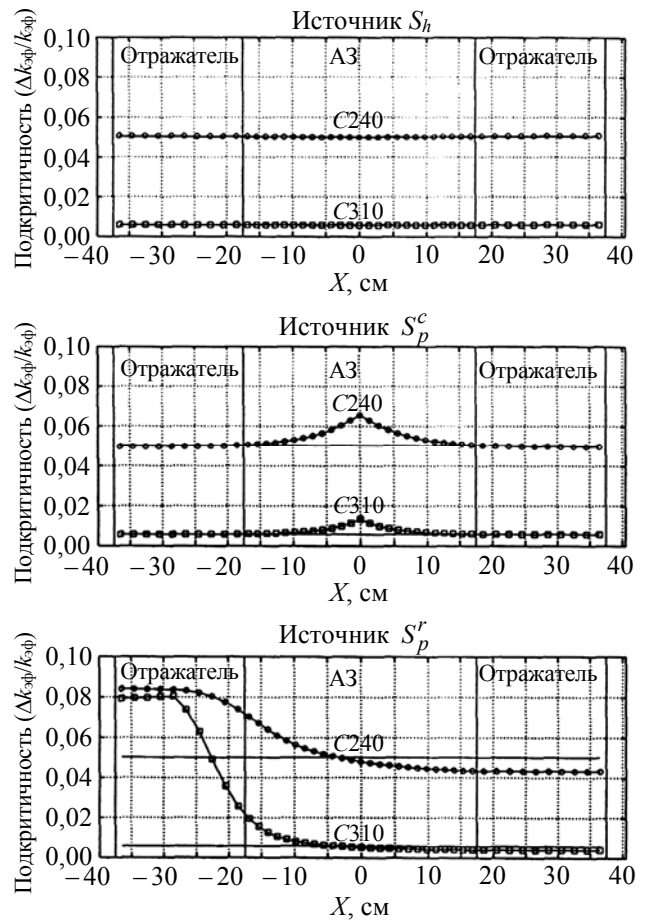


Рис. 3. Подкритичность истинная (—) и оцененная (линии с символами) без выделения фундаментальной гармоники, но с введением коррекций на возмущения

какие коррекции не применяются, ошибка оценки становится очень большой. Если детектор располагается на противоположной относительно позиции источника стороне отражателя, подкритичность оценивается достаточно точно даже при полном отсутствии коррекций.

Для получения более детальной информации о связи оцененных подкритичностей с позициями детектора, исследования этой связи были распространены и на ось  $x_2$ , проходящую через область отражателя (см. рис. 1). Было установлено в результате, что в этом случае оцененные подкритичности, за исключением варианта с присутствием в системе несимметричного источника  $S_p^r$ , практически совпадают с истинными (теоретическими) подкритичностями.

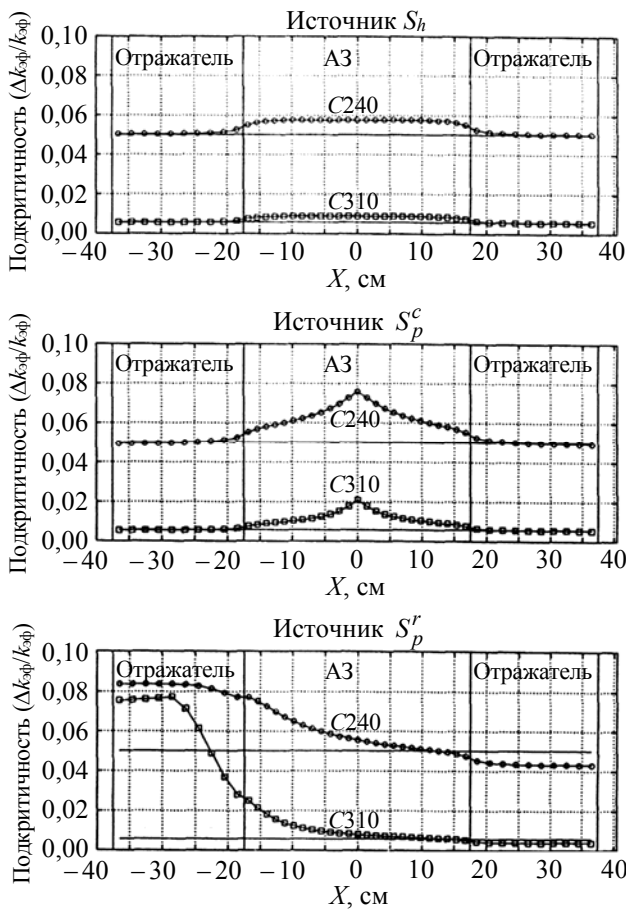


Рис. 4. Подкритичность истинная (—) и оцененная (линии с символами) без выделения фундаментальной гармоника и без введения коррекций на возмущения

Таким образом, в работе [6] предложена версия метода MSM, состоящая из двух этапов корректировочной процедуры:

- 1) извлечения фундаментальной моды из массива измеренных данных;
- 2) корректировки возмущений, индуцируемых вводом реактивности в пространственном распределении фундаментальной моды и поле ценности нейтронов.

Осуществимость предложенной версии метода MSM верифицирована с помощью численных расчетов, относящихся к подкритической системе с малыми размерами и однородным способом добавления реактивности. Показано, что в этом случае предложенный метод способен достаточно точно предсказывать уровни подкритичности системы. В случае точечного нейтронного источника и расположенного вблизи источника детектора

операция извлечения фундаментальной моды очень существенна для результата измерений. Коррекции эффектов пространственных распределений фундаментальной моды и ценности нейтронов важны в случаях, когда детектор размещается в загруженной топливом области. Если детектор размещен в отражателе, вдали от точечного источника, подкритичность определяется с достаточной точностью и без применения каких бы то ни было коррекций.

По мнению авторов статьи [6], при надлежащем выполнении корректировочных процедур предложенная ими версия метода MSM гарантирует достаточно точную оценку подкритичности независимо от размера системы, пространственного распределения источника нейтронов и способа добавления реактивности.

## 1.2. Методики MSM и ASM, применяемые на критических сборках EOLE и MASURCA [3]

Методика MSM и ее упрощенная версия – методика ASM (*Amplified Source Multiplication*) – интенсивно использовались на критических сборках EOLE и MASURCA (CEA, Франция) в целях определения уровней подкритичности различных конфигураций сборок и весов реактивности органов управления. Измерения реактивности на указанных установках проводятся с помощью миниатюрных делительных камер, размещаемых в активной зоне или вокруг нее. Предполагается наличие в сборке конфигурации «референс» с известной, измеренной другими методиками, реактивностью.

Методика ASM использует для определения подкритичности сравнительно простую формулу в виде произведения двух сомножителей: реактивности «референс» и отношения счетностей делительных камер в конфигурации «референс» и возмущенной конфигурации. В случае, если реактивности возмущенной и «референс» конфигураций отличаются незначительно, методика ASM выдает вполне приемлемые по точности результаты.

Если же разница в уровнях подкритичности той и другой конфигурации значительна, то в них станут заметными отличия пространственно-энергетических распределений пото-

ка нейтронов. Это обстоятельство будет приводить к ошибкам в результатах применения методики ASM. В случае значительного отличия подкритичностей двух указанных конфигураций, в результат применения методики ASM необходимо вводить коррекции, исключаяющие вредное воздействие изменений в пространственно-энергетическом распределении потока нейтронов. Эта, в сравнении с ASM, заметно усложненная методика имеет название MSM. Методика MSM, по-существу, и методика ASM подробно рассмотрены в разделе 1.1. Однако теоретический вывод рабочих формул для методик ASM и MSM в статье [3] выполнен иначе: проще, короче и с использованием возросших с годами возможностей вычислительных средств.

*1.2.1. Теоретическое обоснование методик MSM и ASM, применяемых в работе [3].* Как и ранее, в методиках ASM и MSM работы [3] имеют дело с двумя разными подкритическими состояниями: возмущенным и состоянием «референс». ASM и MSM являются относительными методиками, поскольку подкритичность состояния «референс» предполагается известной, а подкритичность возмущенного состояния определяется с помощью привязки к подкритичности состояния «референс».

Методика ASM базируется на модели точечной кинетики, то есть на предположении, что пространственно-энергетическое распределение нейтронов в системе в возмущенном и «референс» состояниях соответствует фундаментальной моде, то есть форм-функции критического реактора.

В отсутствии временной зависимости уравнения кинетики временной модели могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned} \frac{(\rho - \beta_{\text{эф}})}{\Lambda} \bar{N} + \sum_{i=1}^G \lambda_i \bar{C}_i + S_{\text{эф}} &= 0, \\ \frac{\beta_{i,\text{эф}}}{\Lambda} \bar{N} + \lambda_i \bar{C}_i &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\bar{N}$  – эффективное число нейтронов в активной зоне,

$$\bar{N} = \left\langle \varphi^*, \frac{1}{v} \Phi \right\rangle, \quad (4)$$

здесь  $\left\langle \varphi^*, \frac{1}{v} \Phi \right\rangle$  является скалярным произведением, определяемым [8] как

$$\left\langle \varphi^*, \frac{1}{v} \Phi \right\rangle = \int_V \varphi^{*T}(\vec{r}) \frac{1}{v} \Phi(\vec{r}) d\vec{r};$$

$\bar{C}_i$  – эффективная концентрация предшественников запаздывающих нейтронов  $i$ -й группы;  $S_{\text{эф}}$  – эффективный внутренний или внешний источник нейтронов;  $\Lambda$  – время генерации мгновенных нейтронов,

$$\Lambda = \left\langle \varphi^*, \frac{1}{v} \Phi \right\rangle / \left\langle \varphi^*, F\Phi \right\rangle; \quad (5)$$

$\rho$  – реактивность подкритической сборки, равная, согласно уравнениям (3),

$$\rho = -(\Lambda S_{\text{эф}}) / \bar{N}. \quad (6)$$

Если в соотношение (6) ввести скорость реакции в детекторе  $R$ ,  $R = \langle \Sigma_d, \Phi \rangle$ , и выражения для  $\bar{N}$  и  $\Lambda$ , то в результате можно получить

$$\rho = -\frac{S_{\text{эф}} \langle \Sigma_d, \Phi \rangle}{R \langle \varphi^*, F\Phi \rangle}, \quad (7)$$

где  $\Phi$  – поток нейтронов в «референс» АЗ,  $\varphi^*$  – сопряженный поток в критическом реакторе, связанном с реальной АЗ,  $F$  – оператор делений.

Сопряженный поток служит в качестве весовой функции. Используя уравнения точечной модели кинетики, соотношение (7) можно записать в более общем виде как

$$\rho = -\frac{\varepsilon S_{\text{эф}}}{R}, \quad (8)$$

где

$$\varepsilon = \frac{\langle \Sigma_d, \Psi \rangle}{\langle \varphi^*, F\Psi \rangle}. \quad (9)$$

Распределение потока нейтронов  $\Psi$  в соотношении (9) является фундаментальной модой в разложении потока нейтронов по собственным функциям, зависящей только от  $\vec{r}$ ,



$\bar{\Omega}$ ,  $E$ . В стационарном случае распределение потока нейтронов  $\Phi(\vec{r}, \bar{\Omega}, E, t)$  в соотношении (7) может быть заменено на  $\psi(\vec{r}, \bar{\Omega}, E)$ . Это и зафиксировано в выражении (9).

Соотношения (8), (9) показывают, что в предположении постоянства  $\varepsilon$  и  $S_{\text{эф}}$  уровень подкритичности конкретной конфигурации обратно пропорционален скорости счета детектора  $R$ . Из этих соотношений следует также, что, если известны реактивность  $\rho_0$  и скорость счета детектора  $R_0$  в состоянии «референс» и скорость счета детектора  $R_1$  в возмущенном состоянии, то реактивность  $\rho_1$  возмущенного состояния может быть определена как

$$\rho_1 = \frac{R_0}{R_1} \rho_0. \quad (10)$$

Эта методика определения подкритичности названа в статье [3] методикой ASM. Методика ASM применима в случаях, когда справедлива модель точечной кинетики и допустимо предположение о постоянстве  $\varepsilon$  и  $S_{\text{эф}}$ . Как уже отмечалось, это возможно лишь при малом отличии возмущенного и «референс» состояний. При значительном отличии указанных состояний соответствующие им форм-функции тоже заметно различаются, и уже не выполняется предположение о постоянстве  $\varepsilon$  и  $S_{\text{эф}}$ . Подкритичность возмущенного состояния, определенная на основе показаний детекторов, расположенных в разных местах подкритической сборки, будет зависеть от места расположения детектора.

В случае значительного отличия возмущенного и «референс» состояний применяется более сложная методика MSM, в которой, в целях исключения воздействия на результат пространственно-энергетических эффектов, как и в подразделе 1.1, вводятся специальные корректирующие коэффициенты.

При выводе рабочих формул для методики MSM авторы статьи [3] стартуют от транспортных уравнений (неоднородного уравнения и двух однородных), соответствующих

расчетной критической системе. Умножая неоднородное уравнение на  $\varphi^*(\vec{r}, \bar{\Omega}, E)$  и интегрируя по фазовому пространству, получают для возмущенного состояния

$$\rho_1 = - \frac{\langle \varphi^*, S \rangle}{\langle \varphi^*, F\Phi \rangle}.$$

Далее, учитывая, что счетность детектора  $R = \langle \Sigma_d, \Phi \rangle$ , в результате преобразований можно получить

$$\begin{aligned} \rho_1 &= - \frac{\langle \varphi^*, S \rangle}{\langle \varphi^*, F\Phi \rangle} \frac{R}{R} = - \langle \varphi^*, S \rangle \frac{\langle \Sigma_d, \Phi \rangle}{\langle \varphi^*, F\Phi \rangle} \frac{1}{\langle \Sigma_d, \Phi \rangle} = \\ &= - \frac{\varepsilon S_{\text{эф}}}{R}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\varepsilon = \langle \Sigma_d, \Phi \rangle / \langle \varphi^*, F\Phi \rangle$  – эффективность детектора;  $S_{\text{эф}}$  – эффективный источник.

Эффективность детектора зависит от позиции в активной зоне и от его собственных свойств. Через распределение потока нейтронов  $\Phi(\vec{r}, \bar{\Omega}, E)$  эффективность детектора зависит от возмущений, возбуждаемых в его окружении. Эффективность источника зависит от его собственных свойств и от сопряженного потока нейтронов  $\varphi^*(\vec{r}, \bar{\Omega}, E)$ .

Величину реактивности возмущенного состояния методика MSM, как и ASM, выдает с привязкой к реактивности состояния «референс». Если характеристики, относящиеся к возмущенному и «референс»-состояниям, обозначить индексами «1» и «0» соответственно, то с помощью соотношения (11) можно записать

$$\rho_1 = \left( \frac{R_0}{R_1} \rho_0 \right) \left( \frac{\varepsilon_1 S_{\text{эф},1}}{\varepsilon_0 S_{\text{эф},0}} \right). \quad (12)$$

Величина в первой скобке формулы (12) означает реактивность возмущенного состояния, выдаваемую методикой ASM, величина во второй скобке – коэффициент коррекции  $f_{\text{MSM}}$ , вносимый методикой MSM. Коэффици-

коэффициент коррекции  $f_{\text{MSM}}$  учитывает изменения эффективности детектора и источника нейтронов при переходе от состояния «референс» к возмущенному состоянию.

Таким образом,

$$\rho_1 = \left( \frac{R_0}{R_1} \rho_0 \right) f_{\text{MSM}}, \quad (13)$$

$$f_{\text{MSM}} = \frac{\varepsilon_1 S_{\text{эф},1}}{\varepsilon_0 S_{\text{эф},0}}. \quad (14)$$

Как уже отмечалось, коэффициент коррекции  $f_{\text{MSM}}$  нельзя измерить, его определяют с помощью расчетов.

В принципе, методика MSM способна выдавать с приемлемой точностью любые реактивности, независимо от их амплитуды и позиции детектора. Расчет коэффициента коррекции в методике MSM состоит из следующих основных этапов:

1) расчета прямого и сопряженного однородных уравнений переноса нейтронов и получения в результате распределений потока  $\Phi_0(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$  и  $\Phi^*(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$  для возмущенного и «референс» состояний подкритической сборки;

2) расчета собственного источника нейтронов  $S_{\text{ext}}$ ;

3) расчета неоднородного уравнения переноса нейтронов для начальной невозмущенной слегка подкритичной «референс»-конфигурации АЗ («0» состояние). Подкритичность этой конфигурации устанавливается с помощью ввода стержней управления. В результате расчета получают «референс»-распределение потока нейтронов  $\Phi_0(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$ ;

4) расчета неоднородного уравнения переноса нейтронов, соответствующего возмущенному случаю, достигаемому, например, в результате внесения в АЗ поглотителя. В итоге этого расчета получают возмущенное распределение потока нейтронов  $\Phi_1(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$ ;

5) расчета эффективности источника нейтронов и интеграла делений в «референс»- и возмущенном состояниях.

На этапах 3 и 4 расчета неоднородных уравнений переноса нейтронов требуется знание пространственно-энергетического распределения собственного источника нейтронов  $S_{\text{ext}}(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$ , связанного со спонтанными делениями (в случае MOX-топлива) и/или реакции  $(\alpha, n)$  на кислороде (в случае UOX-топлива).

Сделаем одно замечание, очень важное для последующих разделов статьи. Если последовательно применять изложенные выше алгоритмы методик ASM и MSM, расчеты следует выполнять в соответствии с формулой (12). Однако это можно сделать и более просто, вычисляя коэффициент  $f_{\text{MSM}}$  непосредственно с помощью формулы (13) и расчетных значений  $\rho_0^c$ ,  $\rho_1^c$ ,  $R_0^c$ ,  $R_1^c$ , то есть с помощью соотношения (см. статьи [2, 3])

$$f_{\text{MSM}} = \frac{\rho_1^c R_1^c}{\rho_0^c R_0^c}, \quad (15)$$

где индекс «с» означает «расчетный».

Интуиция подсказывает, что оба указанных алгоритма приводят к близким значениям коэффициента  $f_{\text{MSM}}$ . Алгоритм, базирующийся на соотношении (14), представляется более последовательным, логически обоснованным и, вообще говоря, более точным. К тому же он позволяет выявлять масштаб влияния на  $f_{\text{MSM}}$  различных факторов. Но алгоритм, базирующийся на соотношении (15), отличается исключительной простотой. Он делает излишним вывод замысловатых формул на основе манипулирования операторами и может быть с самого начала записан из общих логических соображений.

*1.2.2. Измерения подкритичности, выполненные в рамках программы EOLE.* Критическая сборка EOLE является установкой Комиссариата по атомной энергии Франции (CEA), расположенной в Центре Кадараша. Главное назначение установки – получение экспериментальных данных по нейтронной физике легководных реакторов. Эта установка предоставляет возможность исследования свойств АЗ с UO<sub>2</sub> или MOX-топливом в усло-

виях полного окружения АЗ отражателем. Желательный уровень подкритичности или критичность АЗ устанавливается с помощью изменения концентрации бора или с помощью дополнительных топливных стержней, загружаемых в буферную область.

Подкритические измерения в этой сборке выполняются с использованием миниатюрных делительных камер (диаметр 8 мм, высота 2 мм, масса слоя делящегося вещества около 1 мг, статистика отсчетов 1% в предположении 1σ) в слегка подкритических состояниях и при адаптированных длительностях счета порядка нескольких минут. Камеры размещаются вокруг АЗ, в ее средней плоскости, в целях избежания аксиальных корреляций. Результирующие неопределенности связаны, главным образом, с эффективностью калибровочного пилотного стержня, измеренного с помощью методики сброса стержня. Эта ошибка вряд ли может быть понижена, поскольку она происходит от неопределенности ядерных данных, а именно долей запаздывающих нейтронов, используемых при решении инверсных уравнений точечной кинетики.

Ниже приведены данные измерений на конкретной реализации критической сборки EOLE под названием MISTRAL-4 из программы MISTRAL, посвященной нейтронной физике усовершенствованных легководных реакторов со 100 %-м MOX-топливом.

С помощью методики ASM для «референс»-конфигурации (REF) были проведены

измерения реактивности, вносимой несколькими группами (кластерами) поглощающих стержней. Эти кластеры состояли из 24 стержней различных материалов, таких как нержавеющая сталь, гафний, сплав серебро-индий-кадмий, обогащенный В<sub>4</sub>С, вводились в 24 ведущих трубы центральной (17×17) сборки типа PWR. В целях измерения реактивности АЗ вводились три дополнительные делительные камеры, камера № 1 – в центральную инструментальную трубу, две другие – в смежные участки сборки. Расчеты коэффициента MSM проводились с помощью программного комплекса ERANOS [9].

После каждой серии измерений делительные камеры взаимно заменялись в целях проверки внутренней согласованности их положений и улучшения статистики измерения. Итоговые коэффициенты MSM, полученные из различных расчетных скоростей счета, представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, коэффициенты MSM могут быть как ниже, так и выше единицы, в зависимости от положения источника. Последняя колонка представляет амплитуду разницы (в процентах) между наибольшим и наименьшим значением коэффициента  $f_{MSM}$ . Как и ожидалось, амплитуда коэффициента MSM повышается с эффективностью кластера от нержавеющей стали до гафния и затем до сплава Ag-In-Cd и обогащенного В<sub>4</sub>С.

Таблица 1

Коэффициенты MSM для поглотителей в подкритических конфигурациях MISTRAL-4

Поглотитель в 24 стержнях	Пилотный стержень	Номер делительной камеры			Амплитуда отличий в $f_{MSM}$ , %
		1	2	3	
Нержавеющая сталь	Вверху	1,02	1,062	1,062	5
	Внизу	1,01	1,057	1,057	
Гафний	Вверху	0,796	1,170	1,170	48
	Внизу	0,793	1,164	1,164	
Сплав Ag-In-Cd	Вверху	0,724	1,16	1,16	60
	Внизу	0,730	1,152	1,152	
В <sub>4</sub> С	Вверху	0,559	1,198	1,198	115
	Внизу	0,557	1,190	1,190	

Усредненное воздействие поглотителя на реактивность MISTRAL-4 и соответствующие итоговые неопределенности в зависимости от расположения детектора приведены в табл. 2. По данным этой таблицы можно сделать заключение, что MSM коррекция способна обеспечивать согласующиеся результаты со стандартным отклонением порядка 1–2 %, какими бы ни были детекторы и их позиции.

### 1.3. Результаты применения методик ASM и MSM в быстром реакторе VENUS-F [4]

Методики ASM и MSM успешно применяются в целях определения реактивности различных подкритических конфигураций быстрого реактора VENUS-F. Реактор VENUS-F является базовой установкой в исследовательском проекте GUINEVERE, стартовавшем в 2006-м году в целях изучения возможности трансмутации долгоживущих младших актинидов и продуктов деления в электроядерных установках (*ADS – Accelerator Driven Systems*) и отработки методик он-лайн определения уровней подкритичности в этих устройствах. В виду возникновения этого рода задач действовавший в организации SCK-CEN (Мол, Бельгия) тепловой реактор нулевой мощности VENUS был реконструирован в установку на быстрых нейтронах (VENUS-F) и связан с ускорителем GENEPI-3C, ранее использовавшимся в Кадараши (Франция) в экспери-

ментах MUSE на критической установке MASURCA.

Реактор VENUS-F размещен в цилиндрическом корпусе радиусом ~80 см и высотой 140 см. Решетка АЗ 12×12, окруженная квадратным колпаком из нержавеющей стали, может вмещать до 144 элементов (8×8) см<sup>2</sup> в сечении, которые могут быть топливными сборками, свинцовыми сборками или специальными каналами для размещения детекторов и поглощающих стержней. Остальное пространство в корпусе заполняется полуциркулярными свинцовыми пластинами, действующими в качестве радиального отражателя нейтронов. Дополнительно сверху и снизу АЗ закрывается плоскими свинцовыми пластинами толщиной 40 см.

Модульная форма АЗ благоприятна для изучения различных конфигураций АЗ с разными реактивностями. На рис. 5 показана критическая конфигурация под названием CRO↓. В этой конфигурации 97 топливных сборок (темные участки) размещены так, чтобы создать псевдоцилиндрическую активную зону. Шесть из 97 топливных сборок являются одновременно и стержнями безопасности, изготовленными из карбида бора и имеющими топливное продолжение. При нормальной работе стержни безопасности, то есть их поглощающие нейтроны участки, выдвинуты из активной зоны. В целях идентификации мест

Таблица 2

*Реактивность (в единицах  $\beta_{эф}$ ) поглощающих кластеров в MISTRAL-4, определенная с использованием MSM-коррекции*

Поглотитель в 24 стержнях	Пилотный стержень	Номер делительной камеры			Среднее значение реактивности, $\beta_{эф}$	Стандартное отклонение, %
		1	2	3		
Нержавеющая сталь	Вверху	-0,917	-0,922	-0,920	$-0,925 \pm 0,048$	1,2
	Внизу	-0,941	-0,936	-0,914		
Гафний	Вверху	-15,131	-14,604	-14,684	$-14,842 \pm 0,767$	1,4
	Внизу	-14,853	-14,992	-14,666		
Сплав Ag-In-Cd	Вверху	-15,668	-16,412	-16,008	$-16,230 \pm 0,840$	1,8
	Внизу	-16,401	-16,313	-16,318		
В <sub>4</sub> С	Вверху	-23,262	-23,465	-23,275	$-23,687 \pm 1,235$	1,2
	Внизу	-23,751	-23,832	-23,872		

расположения различных элементов в  $(12 \times 12)$  решетке введена координатная система, в которой, например, верхний левый угол идентифицирован как  $(-6,6)$ , нижний правый угол – как  $(6, -6)$ . В отражателе, с внешней стороны  $(12 \times 12)$  решетки, высверлены шесть цилиндрических полостей, способных вмещать экспериментальные устройства. Эти каналы маркированы на рис. 6 слева направо как  $A1, B1, C1, A2, B2, C2$ . На периферии  $A3$  размещены два стержня управления из карбида бора, используемые для подгонки реактивности  $A3$ , и так называемый PEAR-стержень (в некоторых из рассмотренных здесь работах аналогичный элемент называется «пилотным» стержнем). Вес реактивности и масса PEAR-стержня очень малы. Этот стержень может сбрасываться за время, меньше 0,5 с. Основное его назначение – использование в методике сброса стержня. Слегка подкритичная конфигурация, образуемая в результате сброса PEAR-стержня, называется  $CRO \downarrow$ .

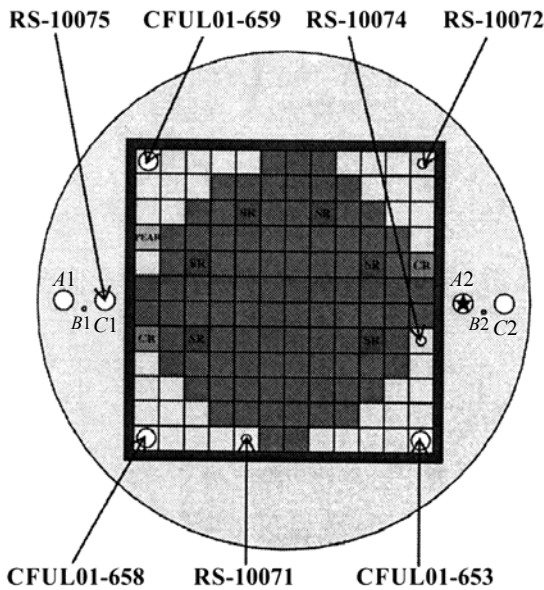


Рис. 5. Среднее поперечное сечение активной зоны VENUS-F в конфигурации  $CRO \downarrow$ : ■ – свинцовый отражатель и свинцовые сборки; ■ – топливные сборки и стержни безопасности с топливными продолжениями; → – места размещения детекторов и стержней с их названиями; ★ – Am-Be источник в позиции  $A2$

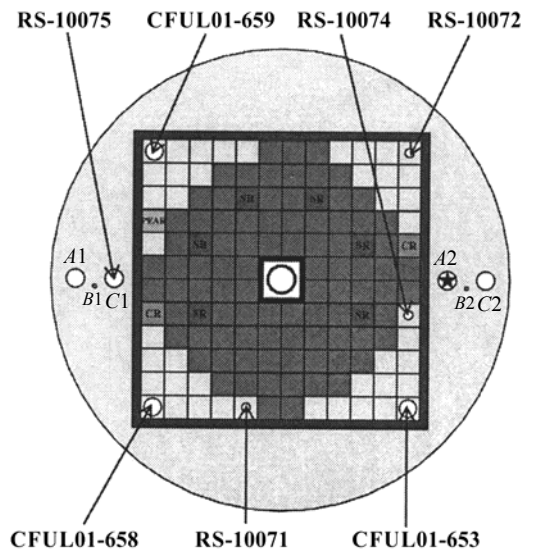


Рис. 6. Среднее поперечное сечение активной зоны VENUS-F в конфигурации  $SC1 \downarrow$ : ■ – топливные сборки и стержни безопасности с топливными продолжениями; □ – пучковая труба ускорителя GENEPI-3C

Каждая топливная сборка содержит  $5 \times 5$  ячеек, заполненных девятью топливными стерженьками, покрытыми никелем, и 16 свинцовыми планками, и упакована в оболочку из нержавеющей стали, окруженную свинцовыми пластинами. Топливом в VENUS-F является металлический уран с массовой долей  $^{235}\text{U}$  30%. Вид топливной сборки в горизонтальном сечении показан на рис. 7.

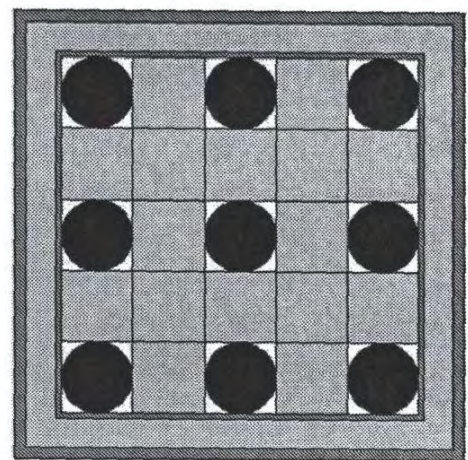


Рис. 7. Вид топливной сборки в поперечном сечении: ● – топливные стержни; ■ – свинец; — — — — — нержавеющая сталь

Главной, наиболее интересной в исследованиях работы [4] является подкритическая конфигурация SC1↓, показанная на рис. 6. Эта конфигурация реактора получена из критической CRO↑ путем сброса стержня PEAR, удаления четырех центральных топливных сборок и введения на их место пучковой трубы ускорителя GENEPI-3C. Ожидалось, что значение  $k_{эф}$  в этой конфигурации должно равняться  $\sim 0,96$ , то есть уровень подкритичности этой конфигурации должен быть глубоким, препятствующим применению обычного метода сброса стержня.

Основные характеристики критической (CRO↑) и двух подкритических (CRO↓, SC1↓) конфигураций АЗ VENUS-F приведены в табл. 3.

Для проведения описанных в статье [4] экспериментов реактор VENUS-F был оснащен Am-Be источником нейтронов и семью делительными камерами (КД), работающими в импульсном режиме. Слои делящегося вещества в трех камерах содержали по 1000 мг высокообогащенного урана, в четырех камерах – по 100 мг. Интенсивность источника нейтронов равнялась  $2,2 \cdot 10^6$  нейтр.  $\cdot$  с<sup>-1</sup>.

Эффективность методик ASM и MSM испытывалась на примере конфигурации SC1↓ с неизвестной глубиной подкритичности. В качестве «референс» принималась слегка подкритическая конфигурация CRO↓. Эта конфигурация создавалась в результате быстрого ввода (сброса) в активную зону, вначале критическую, стержня PEAR. Сброс стержня производился после того, как реактор в течение десятков минут поддерживался в критиче-

ском состоянии и популяция запаздывающих нейтронов в нем достигала равновесия. Реактивность стержня PEAR и уровень подкритичности конфигурации CRO↓ измерялись с особой тщательностью. Выполнялось 15 экспериментов со сбросом стержня PEAR при трех мощностях реактора, равных примерно 2, 4 и 8 Вт. Строго учитывалось влияние на результат измерений различных эффектов, таких как мертвое время детекторов, неточность ядерных констант и т. п. Итоговый результат измерения реактивности конфигурации CRO↓ составил:

$$\rho(\text{CRO} \downarrow) = -0,1801 \pm 0,0024\beta_{эф}.$$

Это значение использовалось в качестве «референс»-реактивности при оценке с помощью методик ASM и MSM реактивности конфигурации SC1↓.

Результаты измерения реактивности VENUS-F в конфигурации SC1↓ с помощью методики ASM приведены в табл. 4. Данные измерений представлены отдельно для каждого детектора. Указаны скорости счета детекторов в конфигурациях CRO↓, SC1↓, отношения  $R$  этих скоростей и полученные значения реактивности в конфигурации SC1↓. Как и ожидалось, ввиду значительного отличия геометрий и реактивностей конфигураций CRO↓, SC1↓ и, следовательно, больших отличий в форме распределения потока нейтронов, значения измеренной реактивности SC1↓ испытывают значительный разброс при переходе от детектора к детектору (разброс в диапазоне от  $-2,87\beta_{эф}$  до  $-5,19\beta_{эф}$ ).

Таблица 3

*Характеристики конфигураций АЗ VENUS-F, изученных в статье [4]*

Характеристика	Конфигурация		
	CRO↑	CRO↓	SC1↓
Число топливных сборок	97	97	93
Параметр критичности	Критична	Слегка подкритична	Глубоко подкритична
Ускоритель GENEPI-3C введен или нет	Нет	Нет	Да
Положение стержня PEAR	Поднят	Сброшен	Сброшен

Реактивность конфигурации  $SC1\downarrow$ , измеренная с помощью методики ASM  
каждым из семи детекторов в отдельности

Детектор	Позиция детектора	$R$ – отношение скоростей счета детектора $C(CRO\downarrow)/C(SC1\downarrow)$	$\rho(SC1\downarrow)_{ASM}, \beta_{эф}$
CFUL01-659	(–6, 6)	27,056±0,945	–5,075±0,064
CFUL01-658	(–6, –6)	27,290±0,043	–5,119±0,065
CFUL01-653	(6, –6)	20,342±0,028	–3,815±0,048
RS-10072	(–6, 6)	20,136±0,073	–3,777±0,049
RS-10071	(–2, –6)	26,325±0,083	–4,938±0,064
RS-10074	(6, –2)	15,289±0,047	–2,868±0,037
RS-10075	C1	27,699±0,139	–5,195±0,070

Детекторы CFUL01-658, CFUL01-659 и RS-10075 дают согласные значения реактивности, видимо, по той причине, что расположены вдали от Am-Be источника и центральной полости. В целом же очевидно, что для получения результатов, согласующихся по всем детекторам, некоторые коэффициенты MSM-коррекции обязательно должны быть рассчитаны.

Коэффициенты MSM-коррекции рассчитывались по формуле (14) с помощью монтекарловской программы MCNP5, использованной совместно с непрерывной по энергии многогрупповой библиотекой ядерных констант ALEPH-LIB-JEFF.3.1.1, созданной в SCK-SEN на базе JEFF.3.1.1.

Вначале геометрия и материальный состав, соответствующие конфигурациям CRO $\downarrow$  и SC1 $\downarrow$ , детально описывались во входном файле MCNP. Затем рассчитывались четыре

сомножителя формулы (14) и коэффициент  $f_{MSM,i}$  ( $i$  – номер детектора). Ошибка в MSM-коэффициенте определялась путем вычисления квадратичной суммы относительных неопределенностей сомножителей и  $C^c(SC1\downarrow)$ . Главным вкладчиком в неопределенность MSM-коэффициентов являлось отношение  $\Delta\rho^c(CRO\downarrow)/\rho^c(CRO\downarrow)$ .

Результаты расчетов коэффициентов  $f_{MSM,i}$  и реактивностей  $\rho(SC1\downarrow)$  представлены в табл. 5. Значения коэффициентов MSM-коррекции изменяются в диапазоне от 2,025 до 1,840. Наибольший коэффициент коррекции относится к детектору, наиболее близкому к источнику нейтронов. В рассматриваемом эксперименте расстояние от детектора до Am-Be источника является ключевым параметром, определяющим коэффициенты  $f_{MSM,i}$ .

Таблица 5

Значения коэффициентов  $f_{MSM}$ , скорости отсчетов  $R_{MSM}$  и MSM реактивности в конфигурации VENUS-F SC1 $\downarrow$

Детектор	Позиция детектора	$f_{MSM}$	$R_{MSM}$	$\rho(SC1\downarrow)_{MSM}, \beta_{эф}$
CFUL01-659	(–6, 6)	1,034±0,022	27,976±0,597	–5,247±0,130
CFUL01-658	(–6, –6)	1,036±0,022	28,972±0,602	–5,303±0,131
CFUL01-653	(6, –6)	1,389±0,030	28,235±0,611	–5,296±0,132
RS-0072	(–6, 6)	1,401±0,030	28,210±0,613	–5,291±0,133
RS-10071	(–2, –6)	1,066±0,028	28,068±0,612	–5,263±0,132
RS-10074	(6, –2)	1,840±0,039	28,132±0,602	–5,276±0,131
RS-100/*–75	C1	1,015±0,022	28,114±0,625	–5,273±0,135
Все	–	–	28,143±0,609	–5,279±0,132

Из сравнения табл. 4 и 5 видно, если MSM-коррекция применяется, то все детекторы дают статистически совместимые значения для  $\rho$  (SC1↓). Это означает, что методика MSM-коррекции хорошо применима к задачам оценки глубоких подкритичностей.

Итоговая оценка реактивности конфигурации SC1↓ реактора VENUS-F в шкале  $\beta_{эф}$  и ее неопределенность получают путем расчета взвешенного среднего и взвешенного стандартного отклонения значений реактивности, выдаваемых семью делительными камерами

$$\rho (SC1\downarrow) = -5,28 \pm 0,13\beta_{эф}.$$

Таким образом, в рассмотренной статье [4] показано:

1) неопределенность итогового результата в основном определяется ошибкой экспериментального значения «референс»-реактивности  $\rho$  (CRO↓) и рассчитанного значения «референс»-конфигурации  $\rho^c$  (CRO↓), входящей в формулу определения коэффициента MSM-коррекции  $f_{MSM}(SC1\downarrow)$ ;

2) точность моделирования в расчетах геометрии и материального состава не только детекторов, но и самого реактора, и даже использование в этих целях их заведомо приближенных моделей, заметного влияния на точность определения коэффициентов  $f_{MSM}(SC1\downarrow)$  и  $\rho (SC1\downarrow)$  не оказывает;

3) указанное выше итоговое значение  $\rho (SC1\downarrow)$  согласуется с реактивностью, измеренной с помощью методики импульсного источника нейтронов [10] и в эксперименте с запрограммированными сбоями непрерывного пучка дейтонов [11]. Согласуется оно и с результатом имитирования  $\rho (SC1\downarrow)$  с помощью программы Монте-Карло MCNP.

## **2. Корректировка реактивности, измеряемой с помощью методики площадей в установке Ялина**

В конце 90-х годов прошлого века в Объединенном институте ядерно-энергетических

исследований (г. Минск, Белоруссия) была сконструирована и построена реакторная установка Ялина, предназначенная для функционирования в подкритическом режиме с внешним источником нейтронов энергией 2,45 или 14,1 МэВ от реакций (D, D) и (D, T) соответственно. В первоначальной конфигурации Ялина представляла собой подкритическую сборку на тепловых нейтронах. На этой сборке испытывались в действии различные методы измерения реактивности, пригодные для управления в будущем установками ЭЛЯУ [12].

Измерения реактивности в установке Ялина проводились с помощью методик импульсного источника, Шестранда и сброса источника. Результаты измерений сравнивались с данными расчетов по программе MCNP.4C3 с использованием трех библиотек нейтронных констант: ENDF/B-VI, JEFF 3.0 и JENDL 3.3. Численное моделирование выдавало также параметры  $\beta_{эф}$  и  $\Lambda$ , необходимые при экспериментальном определении реактивности и  $k_{эф}$ .

В импульсном методе и методе Шестранда генератор нейтронов действовал с частотой повторения импульсов 43 Гц и длительностью импульса 2 мкс.  $^3\text{He}$ -детектор, регистрирующий поток нейтронов, размещался поочередно в различных экспериментальных каналах в средней плоскости АЗ. В эксперименте со сбросом источника нейтронный поток измерялся тем же детектором, размещенным в одном из экспериментальных каналов.

В заметно измененной современной конструкции установки Ялина содержатся зоны с быстрым и тепловым спектром нейтронов. В этой конструкции предусмотрено использование принципа каскадности, т. е. возможности интенсификации размножения нейтронов источника путем разбиения активной зоны на две подзоны с четко выраженной однонаправленной нейтронной связью [13].

АЗ установки в этой конфигурации имеет четыре концентрические прямоугольные зоны: мишенную зону с размером стороны 8 см, внутреннюю быструю зону со стороной 16,4 см, внешнюю быструю зону и тепловую зону со сторонами 49 и 98 см соответственно.



Внутренняя быстрая зона содержит топливные стержни из металлического урана с обогащением 90 % по  $^{235}\text{U}$ . Внешняя быстрая зона содержит уран 36 %-го обогащения, тепловая зона – уран 10 %-го обогащения.

Быструю и тепловую зоны разделяет область поглотителя нейтронов, составленная двумя рядами стержней из природного урана и карбида бора. Область поглотителя позволяет быстрым нейтронам проходить в тепловую зону, но она же поглощает тепловые нейтроны, текущие из тепловой зоны в быстрые зоны. В области поглотителя используется высокое сечение поглощения тепловых нейтронов в реакции  $(n, \alpha)$  на ядрах  $^{10}\text{B}$  и резонансный захват эпитепловых нейтронов в  $^{238}\text{U}$ . Схематический вид установки Ялина в современной конфигурации показан на рис. 8.

Сборка имеет радиальный графитовый отражатель с толщиной стенки, равной 25 см. В качестве матрицы в быстрых зонах использован свинец, в качестве замедлителя в тепловой зоне – полиэтилен. Свинцовые и полиэтиленовые блоки держит решетка из нержавеющей стали. Стальная решетка продолжена в нижний и верхний осевые отражатели, выполненные из борированного полиэтилена. Нижняя половина мишенной зоны занята чистым свинцом, а вторая половина – медным диском, содержащим дейтерий или тритий для

генерирования (D, D)- или (D, T)-нейтронов, вакуумированной пучковой трубкой, каналом для водяного охлаждения и конструктивными элементами из нержавеющей стали. Расположение медного диска совпадает с серединой высоты топливных стержней, равной 50 см.

Установка Ялина оборудована десятью экспериментальными и шестью измерительными каналами. Четыре экспериментальных канала размещены в быстрых зонах, три – в тепловой зоне, три – в отражателе. Два измерительных канала размещены в тепловой зоне, четыре – в области замедлителя.

В работе [2] детально исследована применимость в установке Ялина (сильно гетерогенной быстротепловой подкритической реакторной системе) методик импульсного источника нейтронов и отношения площадей (Шестранда). Авторами работы прослежены сильные и слабые стороны методики Шестранда, считающейся одной из наиболее реалистичных методик для калибровки реактивности в будущих ЭЛЯУ. Показано, что в такой, как Ялина, сильно гетерогенной системе оценки реактивности по методике Шестранда могут отличаться в два раза в зависимости от места расположения детектора, но, вместе с тем, они нечувствительны к возмущениям коэффициента умножения нейтронов внешнего источника.

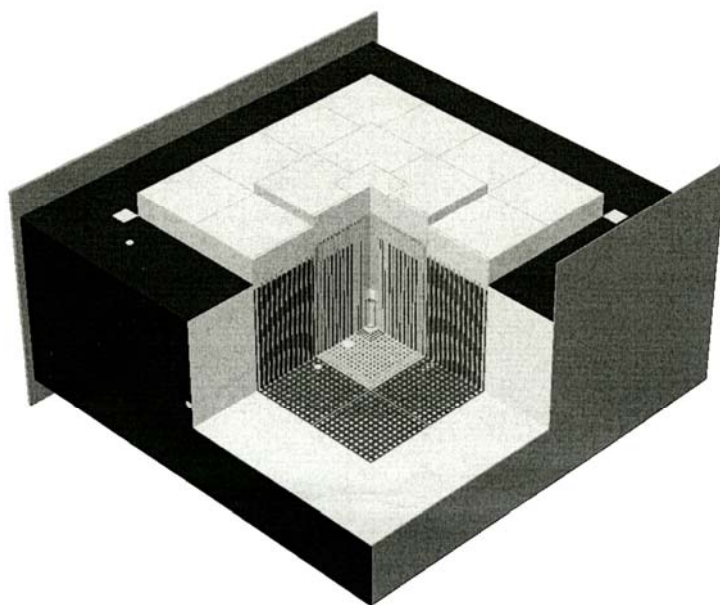


Рис. 8. Общий вид установки Ялина [13]

Свойства методики Шестранда в применении к моделям ЭЛЯУ исследовались во многих работах других авторов, в том числе и на первоначальной версии сборки Ялина. В статье [2] проведено дальнейшее ее изучение в более сложных, можно сказать, экстремальных условиях. Были изучены три конфигурации активной зоны, в том числе две конфигурации с одинаковыми подкритичностями, но разными коэффициентами умножения нейтронов источника, связанными с отличиями в ценности нейтронов. В целях выявления возможных проблем в применениях методики Шестранда на стадии загрузки АЗ, исследовалась также глубоко подкритичная конфигурация си-

стемы с  $k_{эф} \approx 0,85$ . Все конфигурации, за исключением SC6, исследовались как с введенными, так и выведенными управляющими стержнями (CRs). Таким образом, рассматривали пять конфигураций АЗ. Загрузки урана в трех изученных конфигурациях АЗ Ялина представлены в табл. 6.

Реактивности установки Ялина в конфигурациях SC3а, SC3в и SC6, измеренные с помощью методики Шестранда с опорой на показания детектора, размещаемого в различных экспериментальных каналах, представлены в табл. 7. Наиболее важной особенностью этого эксперимента является резкое выпадение

Таблица 6

Содержание топлива в трех конфигурациях АЗ, кг [2]

Конфигурация АЗ	Зона и обогащение топлива			Примерное расчетное $k_{эф}$
	Внутренний бустер; 36 %	Внешний бустер; 36 %	Тепловая зона; 10 %	
SC3а	132	563	1077	0,950
SC3в	0	563	1090	0,950
SC6	132	563	726	0,850

Таблица 7

Результаты измерения реактивности установки Ялина с помощью методики Шестранда [2]

Конфигурация АЗ	Экспериментальный канал	Реактивность, $\beta_{эф}$	
		Регулирующий стержень введен	Регулирующий стержень выведен
SC3а	EC1B	-15,31±0,03	-17,64±0,04
	EC2B	-	-15,63±0,03
	EC3B	-	-10,20±0,01
	EC5T	-8,70±0,06	-9,44±0,04
	EC6T	-	-7,48±0,03
	MC2	-7,23±0,01	-7,85±0,01
	MC3	-7,24±0,18	-7,88±0,21
SC3в	EC1B	-15,17±0,07	-17,48±0,09
	EC2B	-13,92±0,02	-15,28±0,03
	EC3B	-9,64±0,01	-10,21±0,01
	EC5T	-9,26±0,04	-10,07±0,05
	EC6T	-7,42±0,04	-7,60±0,04
	MC2	-7,31±0,01	-7,97±0,01
SC6	EC2B	-43,63±0,07	-
	EC5T	-23,96±0,85	-
	MC2	-20,12±0,18	-

из общего ряда реактивностей, которые получены с детектором, размещенным в бустерной зоне. Как видно из табл. 7, абсолютное значение реактивности, выдаваемое детектором в бустерной зоне, почти в два раза превосходит измеренное детектором в тепловой зоне или отражателе. Такое отличие данных объясняется, по-видимому, заметной изоляцией бустерной зоны от остальной части АЗ вследствие наличия вентилля, а также из-за близости мест расположения детектора и источника нейтронов. Второй фактор усиливает влияние высоких гармоник пространственного распределения потока и этим нарушает предположение о доминировании фундаментальной гармоники.

Наиболее важной особенностью этого эксперимента является резкое выпадение из общего ряда реактивностей, которые получены с детектором, размещенным в бустерной зоне. Как видно из табл. 7, абсолютное значение реактивности, выдаваемое детектором в бустерной зоне, почти в два раза превосходит измеренное детектором в тепловой зоне или отражателе. Такое отличие данных объясняется, по-видимому, заметной изоляцией бустерной зоны от остальной части АЗ вследствие наличия вентилля, а также из-за близости мест расположения детектора и источника нейтронов. Второй фактор усиливает влияние высоких гармоник пространственного распределения потока и этим нарушает предположение о доминировании фундаментальной гармоники.

В целях согласования экспериментальных данных, приведенных в табл. 7, авторами статьи [2], по аналогии с докладом [14], но со своей спецификой, для каждой позиции детектора введены корректирующие коэффициенты, учитывающие влияние пространственно-энергетических эффектов. Было показано, что эти коэффициенты могут быть получены с помощью расчетов по программе MCNP.

Для нахождения корректирующих коэффициентов основное соотношение метода Шестранда  $\rho/\beta_{\text{эф}} = -A_p/A_d$  преобразуется как

$$\rho/\beta_{\text{эф}} = \left(1 - \frac{A_t}{A_p}\right)^{-1}, \quad (16)$$

где  $A_p$  – площадь под участком кривой спада потока нейтронов, связанным с мгновенными нейтронами;  $A_t$  – площадь под участком кривой спада потока нейтронов, связанным с запаздывающими нейтронами;  $A_t = A_p + A_d$  – полная площадь под кривой спада потока нейтронов. (Величины  $A_p$ ,  $A_t$  удобнее для численных расчетов, чем  $A_p$  и  $A_d$ ).

$A_p$  и  $A_t$  рассчитывались с помощью программы MCNP для каждой позиции  $i$  детектора, по формуле (16) определялись для каждой позиции  $i$  детектора расчетные  $(\rho/\beta_{\text{эф}})_{c,i}$ . С помощью той же программы MCNP находили расчетные значения эффективного коэффициента размножения  $k_{\text{эф},c}$  для установки и соответствующее им расчетное значение реактивности

$$\rho_c = \frac{k_{\text{эф},c} - 1}{k_{\text{эф},c}}.$$

Далее делалось вполне допустимое предположение о равенстве отношений,

$$\frac{\rho_{c,i}}{\rho_c} = \frac{\rho_{\text{exp},i}}{\rho_{\text{exp}}}. \quad (17)$$

Из равенства (17) непосредственно следует, что скорректированные значения экспериментальной реактивности и эффективного коэффициента размножения нейтронов равны, соответственно,

$$\rho_{\text{exp}} = \frac{\rho_c}{\rho_{c,i}} \rho_{\text{exp},i} = \frac{\rho_{\text{exp},i}}{c_i},$$

$$k_{\text{эф},\text{exp}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{\rho_{\text{exp},i}}{c_i}\right)},$$

где  $c_i = \rho_{c,i}/\rho_c$  является искомым корректирующим множителем.

Указанный подход предоставил возможность определения скорректированных экспериментальных значений реактивности и  $k_{\text{эф}}$

установки Ялина, к тому же реактивности абсолютной, а не измеренной в единицах  $\beta_{эф}$ .

Корректирующие множители рассчитаны для всех конфигураций АЗ и экспериментальных каналов. Получено, что результирующие значения  $\rho_{exp,i}$  и  $k_{эф,exp,i}$  для разных экспериментальных каналов согласуются между собой. Более того, стали близкими, как это предсказывалось расчетами MCNP, значения  $\rho_{exp,i}$ ,  $k_{эф,exp,i}$  для конфигураций SC3a и SC3в. Сказанное иллюстрирует табл. 8.

Таким образом, в результате измерений с импульсным источником нейтронов в глубоко подкритических конфигурациях установки Ялина показано [2]:

1. Метод Шестранда дает сильно отличающиеся результаты в зависимости от места размещения детектора, в особенности, если детектор размещен в бустерной зоне. Разброс результатов обусловлен близостью расположения детектора к источнику нейтронов и поглощающей вентильной зоне, а также изменениями нейтронного спектра.

2. По-существу, полной ликвидации разброса результатов можно достичь путем введения корректирующих множителей, рассчитываемых по программе MCNP.

### 3. О целесообразности использования способа РМЭ в версиях методики РНИ, применяемых в критмассовых измерениях на установках типа ФКБН

В настоящем разделе статьи обосновывается целесообразность использования способа расчетного моделирования эксперимента в версиях методики размножения нейтронов источника, традиционно используемых при проведении критмассовых измерений. В этих версиях методики РНИ с помощью сравнительно несложных измерительных операций на каждом этапе сборки размножающей системы определяется уровень ее подкритичности в условных единицах реактивности в зависимости от избранного геометрического или материального параметра системы. Например, от размера щели между двумя частями системы или от полной ее массы. Главное же, путем экстраполяции указанной зависимости к нулю с большой точностью находится критическое значение избранного параметра.

Вообще говоря, при проведении собственно критмассовых измерений, сопутствующих сборке размножающей системы, более точная измерительная процедура может и не потребоваться. Но она обязательно потребуется, если нужно получить информацию об уровне подкритичности сборки в абсолютных единицах реактивности или создать на базе методики РНИ реактиметр.

Таблица 8

Скорректированные экспериментальные значения  $k_{эф}$  [2]\*

Экспериментальный канал	Конфигурация АЗ		
	SC3a	SC3в	SC6
EC1B	0,94626±0,00045	0,94978±0,00064	–
EC2B	–	0,94918±0,00048	0,86006±0,00404
EC3B	–	0,94598±0,00046	–
EC5T	0,94527±0,00080	0,94241±0,00075	0,85287±0,00674
EC6T	–	0,94528±0,00061	–
MC2	0,94543±0,00061	0,94613±0,00053	0,86115±0,00666
MC3	0,94578±0,00148	–	–
Среднее значение	0,94585±0,00025	0,94677±0,00097	0,85880±0,00217

\*Корректирующий множитель  $c_i$  рассчитан с использованием библиотеки констант ENDF/B-VII (регулирующий стержень выведен из АЗ).

При проведении критических экспериментов контроль реактивности размножающей системы традиционно осуществляется с помощью измерений коэффициента умножения нейтронов  $Q$  – отношения числа нейтронов, покидающих за единицу времени исследуемую систему, к числу нейтронов, покидающих инертный макет системы. Первые в России критические эксперименты были проведены в 1949 году на химическом комбинате «МАЯК», первый стенд для критических измерений – стенд ФКБН (Физический котел на быстрых нейтронах) – был введен в эксплуатацию в том же году в РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров) [15].

Процедура эксперимента на стенде ФКБН, действовавшая в течение десятилетий, заключалась в следующем [16]. Сначала на стенде ФКБН монтировалась «инертная» модельная сборка, которая отличалась от изучаемой размножающей системы только тем, что вместо делящегося материала в ней устанавливали детали из свинца или меди. В центрах размножающей системы и макета всегда имелась небольшая воздушная полость, в которую устанавливали изотопный источник нейтронов. Поток нейтронов утечки из инертной модели ( $J_0$ ) измерялся так называемым «всеволновым» счетчиком, установленным на некотором расстоянии от размножающей системы.

Затем на стенде ФКБН вместо инертной модели собиралась размножающая система. На каждом этапе сборки размножающей системы измерялся установившийся во времени поток нейтронов утечки и вычислялся коэффициент умножения нейтронов  $Q$ ,

$$Q = (J_{PC} - J_{\Phi}) / J_0, \quad (18)$$

где  $J_{PC}$  – поток нейтронов утечки из размножающей системы с источником нейтронов в центре,  $J_{\Phi}$  – поток нейтронов из размножающей системы без источника.

Критическая геометрия размножающей системы (размер щели между нижней и верхней частями системы) определялась линейной экстраполяцией к нулю зависимости  $\Delta = 1000/Q$ . Условная единица подкритичности  $\Delta_0 = 1$  называлась «ширш» в честь Д. П. Шир-

шова – одного из пионеров критмассовых экспериментов в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Значение величины  $\Delta$  позволяет делать заключения о близости размножающей системы к критическому состоянию. В критическом состоянии  $\Delta = 0$ .

Процедура критмассовых измерений на установке ФКБН в последние годы несколько изменена. Современная процедура характеризуется следующими этапами [17]. Путем изменения состава деталей в размножающей системе подбирается конфигурация сборки, предполагаемо близкая к критической (рис. 9). Затем блоки сборки дистанционно сближаются. Высота подъема нижнего блока сборки фиксируется с помощью жестких упоров в механизме перемещения. Наиболее близкий к критическому состоянию вариант сборки называют стендовой размножающей системой.

Для подобранной стендовой размножающей системы тщательно измеряется штатным «всеволновым» детектором скорость счета  $N$  от сборки с  $^{252}\text{Cf}$  или иным источником нейтронов в центральной полости и без источника нейтронов –  $N_{\Phi}$ . После этого вычисляется коэффициент умножения нейтронов в сборке по формуле

$$Q = (N - N_{\Phi}) / N_0, \quad (19)$$

где  $N_0$  – скорость счета детектора от  $^{252}\text{Cf}$  источника, размещенного на месте центра размножающей системы при отсутствии последней на стенде. По вычисленному значению  $Q$  определяется условная реактивность сборки  $\Delta$ .

Абсолютизация измеренной реактивности не является простой задачей. Имеющиеся приближенные соотношения связи указанной условной и абсолютной реактивностных шкал относятся к компактным быстрым системам из металлического высокообогащенного урана или плутония и к версии методики РНИ, использующей инертный макет [15]. Приложение их к системам больших размеров, с замедлителями нейтронов и инертными разбавителями делящегося материала вряд ли окажется результативным.

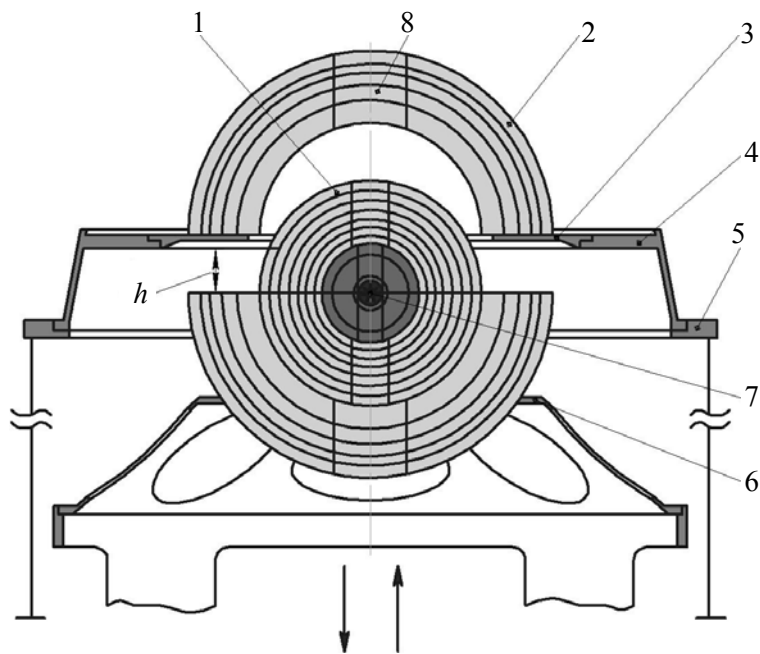


Рис. 9. Схема размещения размножающей системы на стенде ФКБН: ■ – обедненный уран; ■ – плутоний; 1 – нижний (подвижный) блок сборки; 2 – верхний (неподвижный) блок; 3 – стальная диафрагма; 4, 5 – опоры для верхнего блока; 6 – опора для нижнего блока; 7 – источник нейтронов; 8 – пробки;  $h$  – размер щели между блоками

Методика абсолютизации измеренной реактивности, рассматриваемая в статьях [2–4], а также в докладе [14], применима в более широких пределах. И результат использования этой методики, вообще говоря, было бы некорректно назвать приближенным. Представляется, что эта методика вполне адекватна в задаче абсолютизации измеренной условной реактивности в версиях РНИ.

Как можно видеть из текста настоящего раздела, версии методики РНИ (в особенности их современный вариант), применяемые в критмассовых измерениях на стенде ФКБН, мало отличаются или совсем не отличаются от версий РНИ в рассмотренных работах зарубежных авторов. В этой связи очевидно, что абсолютизация результатов измерений в версиях методики РНИ, используемых в критмассовых измерениях на установках типа ФКБН, может осуществляться так же успешно, как и в версиях РНИ зарубежных авторов. В зарубежных работах этот успех достигается в результате использования или опорной реактивности «референс»-уровня, тщательно измеренной с помощью других методик, или способа расчетного моделирования эксперимента

(РМЭ). По мнению автора настоящей статьи, способ РМЭ абсолютизации результатов измерений в методике РНИ, в виду его сравнительной простоты и более широкой области применения, имеет преимущества в сравнении со значительно более сложной процедурой, использующей реактивность «референс»-уровня. Ввиду сказанного в методике РНИ, используемой на установках типа ФКБН, рекомендуется применять именно способ РМЭ.

Применение способа РМЭ в методиках РНИ, используемых на установках типа ФКБН, позволит создать на их базе эффективный измеритель абсолютной реактивности подкритических размножающих систем, в том числе систем, глубоко подкритических, с большими размерами, сложной гетерогенной структурой активной зоны и даже с проявлением эффектов каскадности. Реализация указанного измерителя реактивности не будет связана с требованием выполнения каких-то ограничений в отношении спектра и места расположения источника нейтронов, наличия или отсутствия макетной сборки. От этих факторов будет зависеть только масштаб коэффициента коррекции  $f_{MSM}$ . Коэффициент  $f_{MSM}$

будет минимальным при использовании инертного макета размножающей системы и при расположении источника нейтронов в центре размножающей системы. В этом случае реактивность в условной шкале «ширш» будет наиболее близкой к абсолютной реактивности.

Действующие версии методики РНИ в случае применения в них способа РМЭ будут включать следующие этапы:

1) выполнение традиционной процедуры определения коэффициента умножения нейтронов источника  $Q_{\text{расч}}$  для подкритической размножающей системы путем измерения интенсивности отсчетов «всеволнового» счетчика в потоке нейтронов от размножающей системы с источником, от ее инертного макета с источником или непосредственно от источника (соотношения (18) или (19)). Определение условной реактивности  $\Delta_{\text{эксп}} = 1000/Q_{\text{эксп}}$  указанной подкритической конфигурации;

2) выполнение с помощью программы Монте-Карло моделирующих расчетов  $k_{\text{эф}}$  и интенсивностей отсчета «всеволнового» счетчика для той же, что и в пункте 1, подкритической конфигурации и в тех же потоках нейтронов. Определение на основе расчетных данных расчетной абсолютной реактивности рассматриваемой подкритической конфигурации  $\rho_{\text{расч}} = (1 - k_{\text{эф}})/k_{\text{эф}}$ , расчетного коэффициента умножения нейтронов источника  $Q_{\text{расч}}$  и расчетной реактивности подкритической конфигурации  $\Delta_{\text{расч}} = 1000/Q_{\text{расч}}$ ;

3) определение измеренной абсолютной реактивности рассматриваемой подкритической сборки по формуле

$$\rho_{\text{эксп}} = \Delta_{\text{эксп}} \frac{\rho_{\text{расч}}}{\Delta_{\text{расч}}}. \quad (20)$$

Множитель  $\rho_{\text{расч}}/\Delta_{\text{расч}}$  является коэффициентом коррекции, на который нужно умножить  $\Delta_{\text{эксп}}$ , чтобы получить измеренную реактивность в абсолютной шкале  $k_{\text{эф}}$ .

Как убедительно показано в статье [4], точность задания в расчетах геометрии и ма-

териального состава не только детекторов, но и самого реактора, и даже использование в этих целях их заведомо приближенных моделей, заметного влияния на точность определения коэффициентов коррекции и реактивности  $\rho_{\text{эксп}}$  не оказывают.

## Заключение

Осуществлен поиск разносторонней в применении, сравнительно несложной и достаточно точной, практически полностью избавленной от вредного воздействия пространственно-энергетических эффектов методики измерения абсолютной реактивности подкритических конфигураций критических сборок и реакторов. В этих целях, прежде всего, изучено несколько версий методики РНИ, применяемых в ряде зарубежных институтов при измерениях реактивности глубоко подкритических реакторных состояний и использующих или тщательно измеренную другими методами реактивность «референс»-уровня, или просто расчетный корректирующий множитель. Последний из этих подходов назван здесь способом расчетного моделирования эксперимента (РМЭ). Применение способа РМЭ позволяет достигать успешного результата без использования реактивности «референс»-уровня, и не только в методике РНИ, но и в методике Шестранда.

На основе указанного изучения работ зарубежных авторов выполнено обоснование целесообразности использования способа РМЭ в версиях методики РНИ, применяемых в процедуре критмассовых измерений на установках типа ФКБН.

## Список литературы

1. Кипин Дж. Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. Пер с англ. – М.: Атомиздат, 1967.
2. Berglof C., Fernandez-Ordonez M., Villamarin D. et al. Spatial and source multiplication effects on the area ratio reactivity determination method in a strongly heterogeneous subcritical

system. – Nucl. Sci. Engng, 2010, v. 166, N 2, p. 134–144.

3. Blaise P., Mellier F., Fougeras Ph. Application of the Modified Source Multiplication (MSM) technique to subcritical, reactivity worth measurements in thermal and fast reactor systems. – IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011, v. 58, N 3, p. 1166–1176.

4. Lecouey I. L., Marie N., Ban G., Bianchini G. et al. Estimate of the reactivity of the *VENUS-F* subcritical configuration using a Monte Carlo MSM method. – Annals of Nuclear Energy, 2015, v. 83, p. 65–75.

5. Mizoo N. Theoretical and experimental studies on measurement of large negative reactivities. – JAERI-M-7753, 1972 (на японском языке).

6. Tsuji M., Suzuki N., Shimazu Y. Subcriticality measurement by neutron source multiplication method with a fundamental mode extraction // Journal of Nuclear Science and Technology, 2003, v. 40, N 3, p. 158–169.

7. Shiroya S., Kanda K., Tsuchichashi K. Analyses of reactor physics experiments in the Kyoto University Critical Assembly. – Nucl. Sci. Eng., 1988, v. 100, N 4, p. 525–537.

8. Белл Д., Глестон С. Теория ядерных реакторов. Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1974. С. 496.

9. Rimpault G. The ERANOS code und data system for fast reactor neutronic analyses // PHYSOR. – Seoul, Korea. 2002.

10. Marie N. et al. Reactivity monitoring using the Area Method for the subcritical *VENUS-F* core within the framework of the *FREYA* project // Technology and Components of Accelerator Driven Systems 2. – Nantes, France. 2013.

11. Chevret T. et al. Reactivity measurement of the lead fast subcritical *VENUS-F* reactor using beam interruption experiments // PHYSOR. – Kyoto, Japan. 2014.

12. Person C. M., Seltborg P., Ahlander A. et al. Analysis of reactivity determination methods in the subcritical experiment Yalina // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, 2005, v. 554, p. 374–383.

13. Talamo A., Gohar Y., Bolshinsky I. et al. Monte Carlo analyses of the source multiplication factor of the Yalina booster facility // PHYSOR-08, p. 1059–1064.

14. Carta M., D'Angelo A., Peluse V. et al. Reactivity assessment and spatial time effects from the MUSE kinetics experiments // Proc. Topl. Mtg. Physics of Fuel Cycle and Advanced Nuclear Systems: Global Developments (PHYSOR 2004). – Chicago, Illinois, 2004.

15. Ершова Л. С., Лукин А. В., Хмельницкий Д. В. Коэффициент умножения подкритической размножающей системы и ценность нейтронов источника // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2018. Вып. 4. С. 45–53.

16. Панин А. В., Воронцов С. В., Девяткин А. А., Завьялов Н. В., Кувшинов М. И. История развития критмассовых экспериментов в РФЯЦ-ВНИИЭФ // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2016. Вып. 4. С. 24–39.

17. Кувшинов М. И., Воронцов С. В., Хоружий В. Х. Экспериментальные и расчетные параметры тестовых (benchmark) сферических критических сборок с активной зоной из металлического плутония ( $^{239}\text{Pu}$ (88 %)) в  $\alpha$ -фазе и отражателем из обедненного урана // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2014. Вып. 3. С. 24–33.

Контактная информация –

Колесов Владимир Федорович,  
главный научный сотрудник ИЯРФ,  
РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
e-mail: [otd4@expd.vniief.ru](mailto:otd4@expd.vniief.ru)

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2019, вып. 4, с. 39–62.