

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
АО «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ —
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А. И. ЛЕЙПУНСКОГО»

ФЭИ – 3288

О. Н. Андрианова, Г. М. Жердев, Г. Н. Мантуров, Е. С. Теплухина

**НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКИХ СБОРОК
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДОВ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО
В ГРУППОВОМ И ДЕТАЛЬНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ
НЕЙТРОННЫХ СЕЧЕНИЙ**

Обнинск – 2019

О. Н. Андрианова, Г. М. Жердев, Г. Н. Мантуров, Е. С. Теплухина

Некоторые особенности расчета критических сборок с использованием кодов Монте-Карло в групповом и детальном представлении нейтронных сечений :

Препринт ФЭИ – 3288. — Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2019. — 24 с.

Потребность создания взаимосогласованных расчетных моделей для прецизионных и инженерных нейтронно-физических кодов обусловлена требованиями к аттестации и верификации программного и константного обеспечения в соответствии с Положением о проведении верификации и экспертизы программных средств по направлению «Нейтронно-физические расчеты» (РБ-061-11). Ключевым требованием является реализация методически прозрачной и воспроизводимой процедуры оценки методической и константной компонент погрешности расчёта, которая может быть выполнена только при наличии взаимосогласованных расчетных моделей. В работе на примере серии измерений, выполненных на трех критических конфигурациях БФС-61, обсуждаются факторы, которые необходимо учитывать при создании такого рода моделей, и особенности их применения для расчетов нейтронно-физических характеристик критическихборок БФС. Также продемонстрированы улучшенные функциональные возможности актуализированного программного и константного обеспечения для расчетно-экспериментального анализа интегральных экспериментов на БФС (РОСФОНД/БНАБ-РФ, CONSYST, ММК), позволяющие существенно сократить время и минимизировать вероятность возникновения ошибок при составлении взаимосогласованных расчетных моделей для различных кодов и корректно оценивать методическую и константную компоненты погрешности расчетов в соответствии с РБ-061-11.

The need for mutually self-agreed calculation models for precision and engineering neutronic codes is due to the requirements for the certification and verification of neutron data and software tools in accordance with the Regulations on examination and verification of software for the “Neutronic Physical Calculations” area (RB-061-11). The key requirement is the implementation of a methodically transparent and reproducible procedure for evaluating the methodological and nuclear data uncertainties, which can be performed only if the mutually self-agreed calculation models are available. In this document, using the example of a series of measurements performed on the three critical configurations of the BFS-61, the authors discuss the factors that must be considered when elaborating such models and the nuances of their application for calculating the neutronic characteristics of the BFS critical assemblies. Also it is demonstrated the improved functionality of the updated software tools for the calculation-experimental analysis of integral experiments at the BFS (ROSFOND/BNAB-RF, CONSYST, MMK), which can significantly reduce the time and minimize the likelihood of errors when developing mutually self-agreed calculation models for various codes and correctly evaluate the methodological and nuclear data uncertainties in accordance with RB-061-11.

Ключевые слова: смешанное уран-плутониевое топливо, интегральные эксперименты, стенд БФС, оценка точности, эффективный коэффициент размножения, константная погрешность, метод Монте-Карло, библиотека оцененных нейтронных данных РОСФОНД, БНАБ-РФ, спектральные индексы, интегральный показатель эффективности.

Введение

Анализ интегральных экспериментов на критических сборках является основой обоснования надежности расчетных методик и ядерных данных, оценки различных компонент погрешностей расчета, необходимых для целей верификации и экспертизы расчетных кодов, повышения точности расчетов реакторных параметров и планирования новых экспериментальных программ.

Ключевым требованием Положения о проведении верификации и экспертизы программных средств по направлению «Нейтронно-физические расчеты» (РБ-061-11) [1] является реализация методически прозрачной и воспроизводимой процедуры оценки методической и константной компонент погрешности расчёта, которая может быть выполнена только при наличии взаимосогласованных расчетных моделей бенчмарк-экспериментов на инженерные и прецизионные коды. При этом процедура аттестации кодов включает в себя оценку константной и методической компонент погрешности путем сопоставления результатов расчетов по реперным (прецизионным) кодам и кодам, основанным на каких-либо приближениях в расчете переноса нейтронов.

Целью настоящей работы является демонстрация на примере критических сборок БФС-61 улучшенных функциональных возможностей актуализированного программного и константного обеспечения для расчетно-экспериментального анализа интегральных экспериментов на сборках БФС, позволяющих существенно сократить время и минимизировать вероятность возникновения ошибок при составлении моделей, создавать взаимосогласованные модели для прецизионных и инженерных кодов, а также оценивать методическую и константную компоненты погрешностей, необходимых при верификации и аттестации расчетных кодов в соответствии с Положением РБ-061-11.

Погрешности инженерных расчетов, согласно РБ-061-11 (пп. 13—15), определяются путем сравнения результатов расчетов с соответствующими результатами, полученными по прецизионным (реперным) кодам (п. 22). Прецизионные коды – это коды, результаты расчетов по которым должны исключать погрешности приближений моделирования и обеспечивать адекватное описание эксперимента. Такими характеристиками обладают коды, основанные на методе Монте-Карло. Одной из самых распространенных в мире зарубежных программ такого рода является американская программа MCNP [2]. Среди российских аналогов широкое распространение получила программа MCU [3]. Для обеих этих программ характерно то, что они снабжены универсальным геометрическим модулем. Однако универсальность приводит к повышению временных затрат, поэтому для ускорения выполнения расчетов типовых систем целесообразно использовать адаптированный и оптимизированный геометрический модуль.

Разработанная в ГНЦ РФ – ФЭИ программа ММКК¹ [4] обладает существенно бóльшим (в разы) быстродействием благодаря специализированному геометрическому модулю с широкими возможностями, охватывающими основные потребности описания компоновок как реакторных установок, так и критическихборок БФС. Реализованные в последней версии программы ММК-РФ [5, 6] аналогичные MCNP возможности регистрации потока нейтронов и вычисления усредненных по потоку сечений взаимодействия нейтронов для независимой геометрической сетки позволяют сократить время постобработки результатов расчета экспериментов на БФС. Благодаря оптимизированным функциональным возможностям программа ММК-РФ обладает более высоким быстродействием для проведения расчетно-экспериментальных исследований на критических сборках БФС в сравнении с зарубежными и отечественными аналогами.

Оценка константной составляющей погрешности должна выполняться на основании сопоставления результатов расчетов бенчмарк-экспериментов, выполненным по кодам, реализующим метод Монте-Карло, в детальном и групповом представлении сечений нейтронных взаимодействий. Расчетное описание экспериментов на сборках БФС в групповом представлении нейтронных сечений сопряжено с задачей корректного учета эффектов резонансной экранировки сечений вследствие гетерогенного размещения материалов [7, 8]. В системе подготовки групповых констант CONSYST [9] реализованы приближенные и сравнительно простые для пользователя методы подготовки групповых констант, позволяющие корректно учитывать эффекты пространственной гетерогенности.

Бенчмарк-эксперименты на критических сборках БФС-61

На критических сборках БФС производится экспериментальное изучение реакторно-физических параметров. Состав, размеры и конфигурацииборок подбираются таким образом, чтобы соответствовать аналогичным характеристикам проектируемой реакторной установки. Типовая экспериментальная программа на БФС включает определение критической загрузки, эффективности органов аварийной защиты, компенсации и автоматического регулирования, распределения скоростей различных реакций, отношения скоростей реакций и пр.

Эксперименты, составляющие основу матриц верификации кодов и констант, так называемые бенчмарк-эксперименты, проходят процедуру анализа информации об эксперименте на полноту и достоверность с оценкой погрешности всех факторов, влияющих на результат сопоставления результатов эксперимента с результатами его моделирования. При этом составляется расчетная прецизионная модель эксперимента, максимально приближенная и адекватно описывающая реальную геометрию, материальные составы, компоновку и расположение измерительной аппаратуры критической сборки.

¹ В ранних публикациях использовалось название ММККЕНО.

Краткое описание экспериментов по критичности

В 2009 г. была выполнена оценка экспериментов на критических сборках БФС-61 для международных справочников оцененных бенчмарк-экспериментов [10, 11].

Критические сборки серии БФС-61 были собраны в 1990 г. на стенде БФС-1 для изучения характеристик реакторных установок со свинцовым теплоносителем. В международном справочнике по критической безопасности ICSBER приводится детальное описание расчетных моделей для трех критических конфигураций сборок БФС-61-0, -1, -2; в международном справочнике по реакторным экспериментам IPRhEP — расчётные модели для измерений распределения скоростей реакций и спектральных индексов.

Сборки БФС-61 (рис. 1) имели типовую компоновку и были составлены из стальных труб, заполненных таблетками металлического плутония, обедненного металлического урана, свинца, графита и пр. Сборка БФС-61-0 (рис. 1а) имела трехслойный боковой отражатель из свинца (составленный из таблеток свинца двух типов), стали и обедненной двуокиси урана. В сборке БФС-61-1 (рис. 1б) использовался двухслойный отражатель, состоящий из слоев свинца и обедненной двуокиси урана. В сборке БФС-61-2 (рис. 1в) отражатель был однослойный и состоял из обедненной двуокиси урана. В межтрубных зазорах отражателя размещались вытеснители из нержавеющей стали.

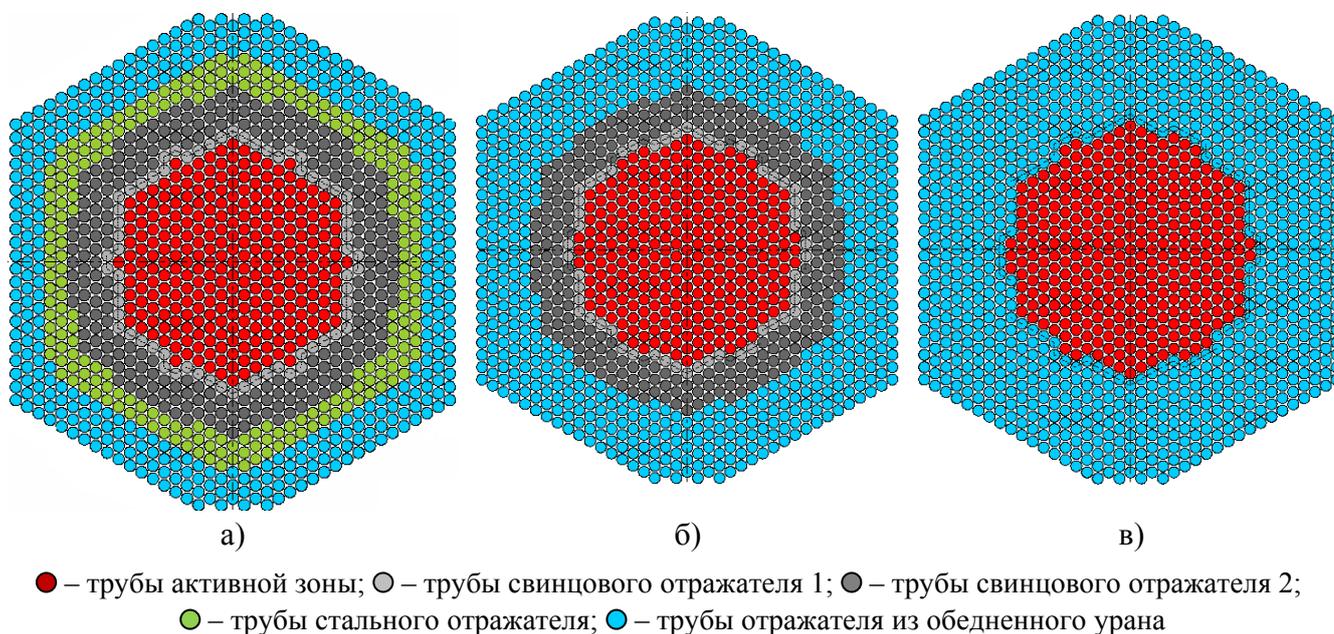


Рис. 1. Картограмма сборки:
а) БФС-61-0, б) БФС-61-1, в) БФС-61-2 [10, 11]

Краткое описание экспериментов по измерению спектральных характеристик

В программу экспериментальных исследований на сборках БФС-61 входили измерения отношений сечений взаимодействия нейтронов ($\langle \sigma_f^i \rangle / \langle \sigma_f^j \rangle$), усредненных по спектру в некоторой точке критической сборки (спектральные индексы), содержащие в себе богатую информацию о свойствах изучаемой композиции реактора на быстрых нейтронах [12, 13]. По определению,

$$\langle \sigma_x^i \rangle / \langle \sigma_f^j \rangle = \int_E \varphi(E) \sigma_i dE / \int_E \varphi(E) \sigma_j dE,$$

где $\varphi(E)$ – спектральная плотность потока нейтронов; $\langle \rangle$ – символ усреднения по энергии, i и j – тип изотопа, x – тип реакции (например, f – деление). Для таких измерений выбирают изотопы и ядерные реакции, дающие значимый вклад в баланс нейтронов в реакторе, или реакции, энергетическая зависимость которых подчеркивает специфику отдельных областей спектра нейтронов.

На сборках БФС-61 малогабаритной камерой деления (МКД) были выполнены измерения отношения среднего сечения деления изотопов (^{232}Th , $^{233,238}\text{U}$, ^{239}Pu) к среднему сечению деления ^{235}U и отношения среднего сечения деления минорных актинидов ($^{238,240,241,242}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{237}Np) к среднему сечению деления ^{239}Pu .

Конструкция МКД описана в справочнике [11], корпус камеры представляет собой трубку из нержавеющей стали диаметром 6 мм и длиной 140 мм с толщиной стенки 0,5 мм. Внутри камеры закреплена другая трубка диаметром 4 мм и длиной 40 мм с толщиной 0,2 мм, на внутреннюю поверхность которой нанесен слой делящегося материала высотой 30 мм. Камера заполнена аргоном под давлением 10 атм.

При измерениях спектральных индексов камеру устанавливают таким образом, чтобы середина слоёв с делящимися материалами, расположенных внутри камеры, совпадала с центральной плоскостью активной зоны сборки (с серединой топливной композиции в центральной трубе). На рисунке 2 показана типовая схема размещения малогабаритной камеры деления в межтрубном пространстве.

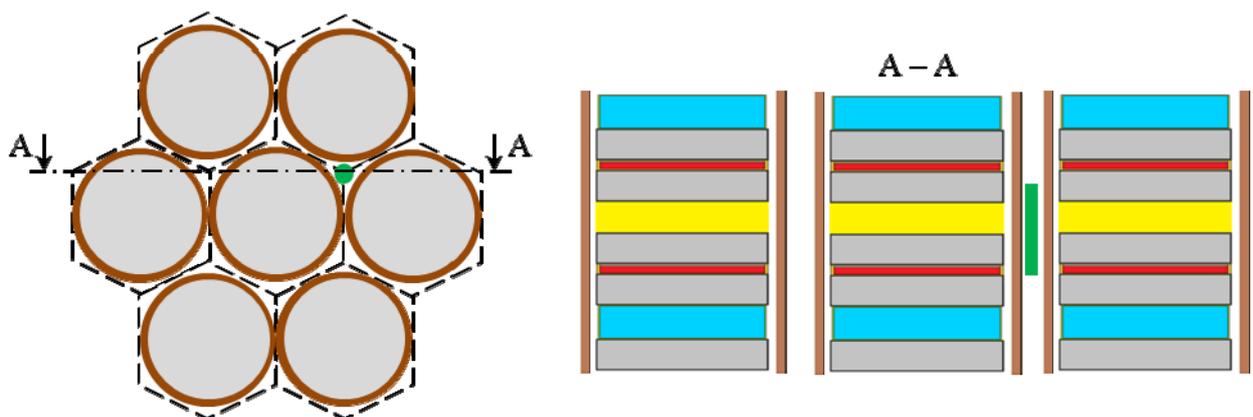


Рис. 2. Схема размещения малогабаритной камеры деления

Особенности расчетных моделей в групповом и детальном представлении нейтронных сечений

Учет гетерогенных эффектов в групповом приближении

Особенностью компоновки активной зоны критсборок БФС является размещение в трубах таблеток из делящихся, воспроизводящих и поглощающих материалов диаметром 47 мм и высотой от 0,3 до 100 мм. Наполнение труб имеет сильно неоднородную структуру, состоящую из чередующихся областей резонансных материалов, в которой линейные размеры отдельных однородных областей сравнимы с длиной свободного пробега нейтронов в этой области. При таком размещении материалов расчеты с использованием групповых констант, предназначенных для расчетов гомогенных сред и учитывающие только эффекты гомогенной резонансной блокировки, могут приводить к некорректным результатам. В этом случае многогрупповой расчет (с использованием подгрупп) может недостаточно точно передавать детали пространственного распределения нейтронных потоков в неоднородных областях.

Существует множество приближенных и достаточно простых для реализации методов учета гетерогенных эффектов по подготовке групповых сечений для расчетов неоднородных сред [7, 8]. Отметим, что если линейные размеры однородных областей, в состав которых входят изотопы с резонансным ходом сечений, превышают длину свободного пробега нейтронов в этих областях, то целесообразно производить гомогенизацию среды, основываясь на предварительном гетерогенном расчете. Однако в случае, когда размеры однородной области могут превышать длину пробега нейтронов, но при этом нельзя пренебречь возможностью пролета нейтрона сквозь эту область без взаимодействия, учет резонансной экранировки сечений можно выполнять достаточно корректно приближенными способами, вводя соответствующие поправки в расчет сечения разбавления.

При выполнении многогрупповых расчетов стандартную 299-групповую структуру можно детализировать, проводя учет резонансной самоэкранировки сечений в подгрупповом приближении для одного и более материалов с использованием автономной программы SUBGRAN [14]. При этом для остальных материалов резонансная самоэкранировка будет учитываться с помощью факторов резонансной самоэкранировки Бондаренко и при необходимости с учетом гетерогенности в приближении теоремы эквивалентности.

Оценка константной и методической компонент погрешности расчета

Отметим, что процедура оценки эксперимента подразумевает, что при описании расчетной модели должны быть указаны и оценены вклады в расчетное значение от всех принятых упрощений и приближений расчетных методик. Целесообразно оценки этих упрощений и приближений производить последовательно, опираясь на результаты расчета по прецизионной модели. Схематически процедура оценки погрешностей представлена на рис. 3.

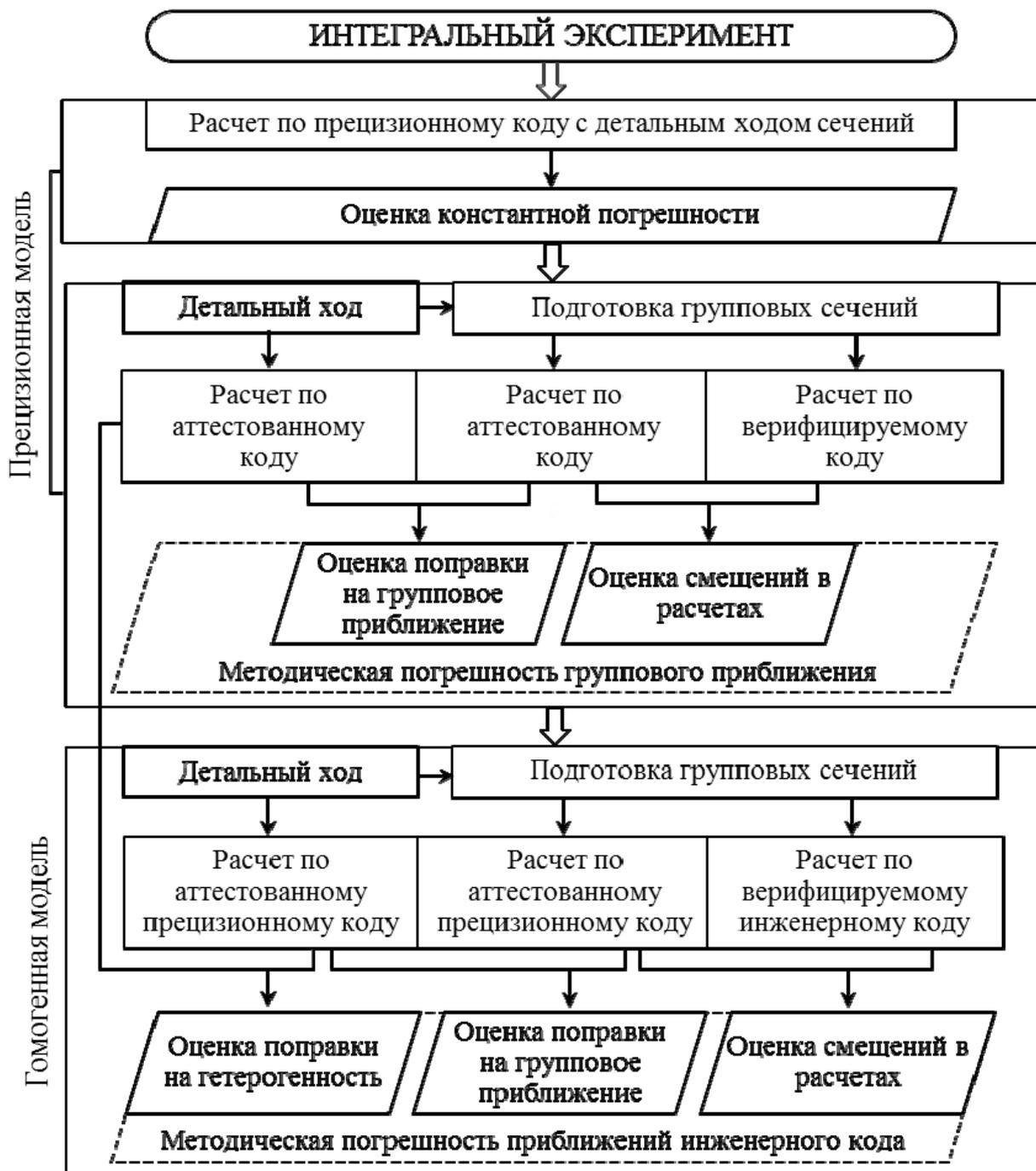


Рис. 3. Схема последовательности проведения расчетов для оценки погрешностей функционалов

На первом этапе составляется расчетная модель для прецизионного кода, реализующего метод Монте-Карло и позволяющего проводить расчеты с детальным представлением хода нейтронных сечений, без введения каких-либо методических приближений и упрощений, связанных с описанием реальной композиции и компоновки сборки.

Далее, на втором этапе, основываясь на данной расчетной модели для кода, реализующего метод Монте-Карло, и не изменяя ее с точки зрения описания геометрии, переходить на многогрупповые расчеты, оценивая константную составляющую погрешности путем сопоставления результатов двух расчетов. На дан-

ном этапе также можно оценить методическую составляющую погрешности, связанную с реализацией группового приближения в конкретном коде, реализующего метод Монте-Карло [15]. При этом расчетные модели на эти коды должны быть полностью идентичны и иметь единое расчетное задание на подготовку макроконстант.

На третьем этапе может быть осуществлен переход от прецизионного описания компоновки и композиции сборки к гомогенизированным составам, при этом вносятся изменения в расчетную модель в части описания геометрии.

Сравнение результатов расчетов по коду, основанному на методе Монте-Карло, с детальным представлением нейтронных сечений для гомогенной и гетерогенной модели дает возможность оценить расчетную поправку на гетерогенность. С помощью прецизионных расчетов могут быть определены следующие компоненты погрешности: константная, методическая, связанная с групповым приближением и погрешность, обусловленная переходом к гомогенной модели. Далее при сравнении результатов расчетов по гомогенным моделям, выполненным по различным кодам, с результатом расчета той же модели по прецизионному коду на единой константной базе можно оценить погрешности приближений, заложенных в инженерные коды.

Учет гетерогенных эффектов в системе CONSYST

Общие замечания о введении гетерогенных поправок

В системе CONSYST реализовано несколько способов учета гетерогенных эффектов при подготовке многогрупповых макроскопических сечений, основанных на принципе эквивалентности гомогенных и гетерогенных сред (теоремы эквивалентности):

- 1) *«ручной» ввод поправок* — пользователь имеет возможность вручную вычислить поправки к сечению разбавления: а) вводом фиктивного изотопа δ -рассеивателя; б) путем выделения дополнительных материальных зон блокировки;
- 2) *автоматическое вычисление поправок* — система может автоматически вычислить величины поправок, если пользователь описал реальную гетерогенную структуру с помощью блока GETER.

Если размеры однородной области сравнимы с длиной свободного пробега, а в состав ее входят изотопы с резонансным ходом сечений, то в этой области может быть введен фиктивный изотоп с именем D-SC, так называемый δ -рассеиватель, не вносящий изменений в процесс переноса нейтронов, а влияющий на учет резонансной самоэкранировки сечений. Полное сечение δ -рассеивателя равно 1 барн, а средний косинус угла рассеяния равен единице. Концентрация δ -рассеивателя выбирается равной $1/\ell$, где $\ell = 4V/S$ — средняя хорда или среднее значение длины пути нейтрона в зоне без учета столкновений, V — объем, а S — площадь поверхности.

Если рассматриваемая область среды имеет гетерогенную структуру, составленную из множества одинаковых чередующихся друг с другом зон, то может оказаться целесообразным рассматривать среду в целом как гомогенную. В системе CONSYST предусмотрено два класса материальных зон, различающихся нуклидным составом — материальные зоны блокировки и физические зоны. Зоны блокировки служат для расчета факторов резонансной самоэкранировки, а расчет же нейтронных полей проводится в системе, состоящей из физических зон. Каждой физической зоне ставится в соответствие зона блокировки, как правило, близкая или совпадающая с ней по составу.

Учет гетерогенных эффектов в приближении теоремы эквивалентности можно производить, передавая CONSYST информацию о реальной ячеечной структуре среды. В этом случае программой будет произведен пересчет сечений разбавления резонансных изотопов с учетом геометрии ячейки, а концентрация δ -рассеивателя будет вычислена автоматически с учетом конкретной геометрии гетерогенной ячейки с вычислением поправок в сечение разбавления: 1) поправки Данкова, учитывающей взаимодействие блоков в бесконечной периодической решетке и 2) фактора Белла, зависящего от толщины блока [8].

Примеры реализации «ручного» ввода поправок

В справочнике ICSBER приводятся расчетные модели и примеры расчетных заданий для прецизионных кодов MCNP и MMKK для детального хода и группового представления нейтронных сечений соответственно. Учет резонансных эффектов в групповом приближении выполнен путем «ручного» введения поправок через задание дополнительных материальных зон.

Задание на расчет макроскопических сечений в данном случае усложняется, поскольку пользователь должен описать два набора материальных зон, различающихся нуклидным составом и концентрациями — это физические зоны, в которых концентрации задаются согласно описанию параметров структурных элементов, и зоны блокировки, концентрации в которых вычисляются исходя из вводимых предположений.

В зависимости от состава труб различных типов, присутствующих в активной зоне одновременно, таблетки из одного и того же материала (физические зоны) могут размещаться в областях с различной степенью гетерогенности. Например, одинаковые таблетки могут входить в состав различных ячеек, т. е. чередоваться с разными таблетками из других материалов, или вся труба может быть заполнена одними и теми же таблетками.

Таким образом, в зависимости от местоположения материалов пользователю приходится дублировать (в некоторых случаях многократно) зоны с одним наполнением для возможности корректного определения блокировок. Например, таблетки, содержащие диоксид обедненного урана, размещались в различных по компоновке трубах, что потребовало введения четырех дополнительных зон блокировки.

Материальные зоны, в состав которых входили изотопы ^{238}U и ^{239}Pu , дублировались с сохранением концентраций и введением фиктивного изотопа δ -рассеивателя со значением концентрации, соответствующей $1/\ell$. Для физических зон, описывающих трубы, оболочки таблеток и вытеснители, вводились дополнительные зоны блокировки с гомогенизированным составом. При этом увеличивалось число материалов с 18 до 48 и усложнялось расчетное задание на CONSYST, а также изменялось задание на ММКК в части описания геометрии. Таким образом, расчетные модели на MCNP и ММКК не согласованы.

В этих условиях невозможно корректно проводить сравнения двух типов расчетов с использованием группового и детального хода сечений для выявления константной составляющей погрешности.

Расчеты по ММКК проводились с использованием библиотеки многогрупповых констант БНАБ-93 [16]. Для двух изотопов, ^{238}U и ^{239}Pu , использовалось подгрупповое описание резонансной структуры сечений.

На данный момент существуют усовершенствованные системы подготовки констант CONSYST, такие как CONSYST-RF [17], CONSYST-БР [18] и др. В отличие от предыдущей версии системы (CONSYST-0601 [19]) в новых версиях, например, в CONSYST-RF предусмотрена возможность проведение расчетов, как с ранее созданной библиотекой групповых констант БНАБ-93, так и с актуальной версией БНАБ-РФ [20-22].

В таблице 1 приведены результаты расчетов критичности трех конфигураций сборки БФС-61 для расчетных моделей из справочника ICSBER [10] с использованием CONSYST-RF и библиотек констант БНАБ-93 и БНАБ-РФ. Отметим, что подгрупповое разбиение для библиотеки БНАБ-РФ тех же изотопов, ^{238}U и ^{239}Pu , значительно превышает разбиение для БНАБ-93 (для БНАБ-93 – итоговое число групп 756, для БНАБ-РФ – 1158).

В таблице 1 в скобках показана статистическая погрешность (последние значащие цифры) расчетов критичности для каждой конфигурации сборки БФС-61. Различия в результатах расчетов по коду ММКК с использованием разных версий CONSYST практически отсутствуют и находятся в пределах статистической погрешности, и не превышают 1σ . Таким образом, результаты, приводимые в табл. 1, демонстрируют, что переход от предыдущей версии системы CONSYST-0601 к новой CONSYST-RF не приводит к смещению расчетных величин.

Таблица 1. Результаты расчетов критичности сборок БФС-61 для расчетных моделей, приведенных в справочнике ICSBER

Конфигурация БФС-61	CONSYST-0601/ БНАБ-93 [10]	CONSYST-RF/ БНАБ-93	CONSYST-RF/ БНАБ-РФ
61-0	0,99860 (50)	0,99891(21)	0,99932(21)
61-1	0,99630 (50)	0,99668(20)	0,99674(21)
61-2	0,99690 (50)	0,99707(21)	0,99499(20)

Примеры реализации автоматического учета поправок

В последней версии системы CONSYST-RF реализован автоматический учет гетерогенных эффектов в приближении теоремы эквивалентности, т. е. путем введения поправок в сечения разбавления при расчете факторов резонансной самоэкранировки (блок GETER). Параметры ввода параметров гетерогенной области среды в блок GETER приводятся в таблице 2.

Таблица 2. Порядок ввода информации о гетерогенной ячейке в блоке GETER

Название параметра или блока параметров	Варианты значений	Описание и определение
CELL i	i 0 1 2 3 4	Параметр определяет геометрию ячейки: <i>плоская</i> <i>цилиндрическая</i> <i>сферическая</i> <i>шестигранная</i> <i>квадратная</i>
ZONE Nf, Nall, d(1), d(2), ..., d(Nall)	Nf Nall d(1), d(2), ..., d(Nall)	В блоке параметров описывается ячейка, определяющая зону блокировки (гомогенизированная ячейка): номер слоя с резонансным поглотителем число слоев в ячейке радиусы слоев в см; радиусы откладываются от начала ячейки, не путать с толщиной слоя
DANK danc	danc	значение фактора Данкова; можно не задавать, расчет будет произведен в приближении Вигнера
BELL bell	bell	значение фактора Бэлла; можно не задавать, и тогда он будет рассчитан
BUCKL buckl	buckl	значение аксиального материального баклинга; при задании этого параметра сечения поглощения и полное будут увеличены на $B^2/3\Sigma_{tr}$, по умолчанию=0
MATERIALS mat(d(1)), mat(d(2)), ..., mat(d(Nall))	mat(d(1)), mat(d(2)), ..., mat(d(Nall))	номера материалов в порядке соответствия слоям ZONE ; если в задании необходимо ввести пустоту, то на позиции материала указывается 0; номера материалов берутся из общего описания задания для CONSYST

Задание конкретной геометрии гетерогенной ячейки в блоке GETER позволяет автоматически вычислять поправки Данкова и фактор Белла для сечения разбавления изотопа с резонансным ходом сечения. Для остальных изотопов автоматически вычисляются концентрация для δ -рассеивателя. Использование блока GETER позволяет упростить составление задания на подготовку многогруппо-

вых макроскопических сечений для CONSYST. Так, пользователю не нужно проводить дополнительные расчеты концентраций, вводить дополнительные дублирующие материалы.

Приведем пример составления задания для блока GETER в системе CONSYST-RF. На рисунке 4 представлена топливная ячейка сборки БФС-61. В ее составе присутствуют таблетки металлического плутония и таблетки обедненного металлического урана как топливные зоны. Основными условиями составления задания для блока GETER являются:

- выделяемая гетерогенная ячейка может содержать только одну топливную зону с резонансным поглотителем, для которой будет выполнен расчет, если же в описании будет присутствовать вторая резонансная зона, то она не будет рассматриваться как резонансный поглотитель,
- ячейка должна быть симметричной.

Необходимо ввести две симметричные ячейки для корректного описания геометрии БФС-61: в первой ось симметрии совпадает с центром таблетки графита; во второй — с осью симметрии таблетки обедненного металлического урана.

Блок задания GETER для такого представления выглядит следующим образом:

```

GETER:
CELL 0
ZONE 6, 13, 0.492, 0.522, 1.442, 1.472, 1.502, 1.542, 1.762,
      1.792, 1.822, 2.742, 2.772, 2.802, 3.812, 3.842
MATERIALS 5, 10, 9, 10, 2, 0, 1, 2, 10, 9, 10, 14, 13, 14
CELL 0
ZONE 1, 6, 0.505, 0.535, 0.565, 1.485, 1.515, 1.715
MATERIALS 13, 14, 10, 9, 10, 7
END
  
```

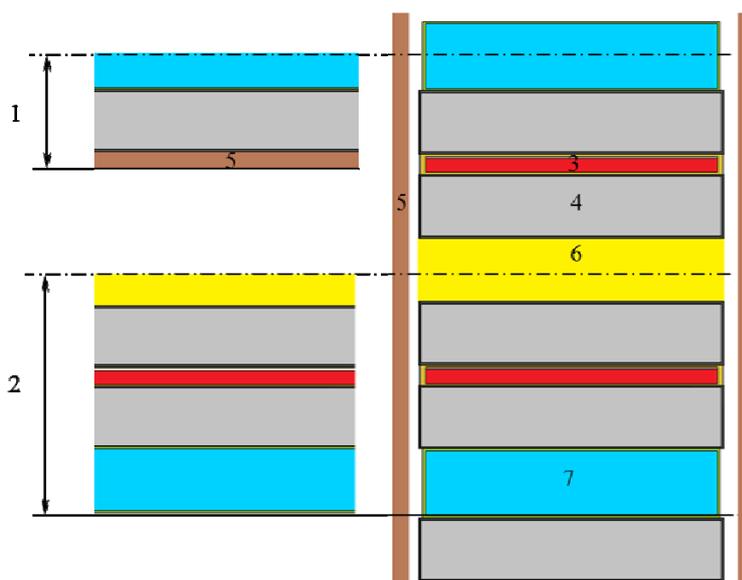


Рис. 4. Послойное представление в блоке «GETER» ячеек 1 и 2, составленных из таблеток: 3 – плутония, 4 – свинца, 5 – стали, 6 – графита и 7 – обедненного урана

Описание приводится для половины ячейки. Для первой ячейки данная запись означает, что выбран тип «плоская ячейка» (CELL 0); в половине ячейки 13 слоев, в 6-м слое находится резонансный поглотитель (металлический плутоний). Далее перечисляются толщины 13 слоев, суммируя толщины от слоя к слою. В соответствии толщинам перечисляются составы слоев. Материал 0 означает пустоту. Аналогично описывается половина второй ячейки, в которой резонансным поглотителем выступает металлический уран. В этой ячейке включена в виде слоя труба из нержавеющей стали с соответствующей толщиной 0,2 см и материалом 7.

Другим важным изменением в системе CONSYST-RF является самостоятельное определение системой, для каких зон и как учитывать анизотропию полного сечения. Для этого пользователю достаточно задать индикатор $idelta=-1$, вместо реализованного ранее двойного расчета задания с $idelta=1$ и $idelta=0$, с дальнейшим привлечением программы WAX из программного комплекса СКАЛА [23], в которой пользователю нужно указать какие материалы взять из первого расчета, а какие из второго.

Все вышеупомянутые изменения в программе подготовки констант CONSYST позволили пользователю «прозрачно» описать геометрию конфигураций сборок. В процессе изучения моделей для расчета нейтронно-физических характеристик по программе ММКК было замечено, что в описании геометрии были внесены некоторые упрощения. Авторами было принято решение внести корректировки в описание геометрии моделей, размещенных в справочнике ISCBER, и дополнить их до детального описания, соответствующего моделям для MCNP, чтобы в последующем при проведении сравнительных расчетов двумя кодами не возникало сомнений в аналогичности двух моделей.

Результаты расчетов и их сопоставление

Результаты расчета критичности

Расчеты нейтронно-физических характеристик для трех конфигураций БФС-61 были выполнены по кодам ММКК, ММК-РФ и MCNP. Значения и статистическая погрешность расчетов критичности для каждой конфигурации сборки БФС-61 приведены в таблице 3. Подготовка многогрупповых блокированных констант для кодов ММКК и MCNP осуществлена с помощью CONSYST-RF с использованием блока GETER. Расчеты проводились с использованием подгрупп для ^{238}U , ^{239}Pu и природной смеси Fe, при этом общее число групп составило 1520. Также проведены дополнительные расчеты с детальной энергетической зависимостью сечений по программе MCNP и ММК-РФ с использованием библиотеки РОСФОНД [24].

Значения, приведенные в пятом и шестом столбцах табл. 3, демонстрируют, что учет гетерогенных поправок в системе CONSYST-RF в ручном и автоматическом режимах не приводит к изменениям в результатах расчетов.

Таблица 3. Результаты сравнения расчетов критичности для различных кодов и библиотек

Конфигурация БФС-61	ММК-РФ	МСNP		ММКК	ММКК
	взаимосогласованная расчётная модель				модель из [10]
	РОСФОНД	РОСФОНД	БНАБ-РФ	БНАБ-РФ	БНАБ-РФ
БФС-61-0	0,99661(20)	0,99722(12)	1,00013(13)	0,99969(21)	0,99932(21)
БФС-61-1	0,99463(19)	0,99507(12)	0,99971(12)	0,99671(21)	0,99674(21)
БФС-61-2	0,99398(19)	0,99405(13)	0,99733(12)	0,99507(21)	0,99499(20)

Таблица 4. Результаты сравнения групповых расчетов критичности, полученных по различным кодам (P1 – БНАБ-93, P2 – БНАБ-РФ)

Конфигурация БФС-61	МСNP		ММКК		ММКК	
	взаимосогласованная расчётная модель				модель из [10]	
	БНАБ-93	P1/P2-1, %	БНАБ-93	P1/P2-1, %	БНАБ-93	P1/P2-1, %
БФС-61-0	0,99972(12)	-0,04±0,02	0,99973(21)	0,00±0,02	0,99891(21)	-0,04±0,02
БФС-61-1	0,99910(13)	-0,06±0,02	0,99616(21)	-0,06±0,02	0,99668(20)	-0,01±0,02
БФС-61-2	0,99960(13)	0,22±0,02	0,99734(21)	0,23±0,02	0,99707(21)	0,20±0,02

Сравнение результатов расчетов с использованием библиотек БНАБ-93 и БНАБ-РФ приведено в таблице 4. Расхождения результатов, полученных по разным версиям групповой библиотеки БНАБ, в 0,2% для конфигурации сборки БФС-61-2 обусловлено различием нейтронных констант в библиотеках БНАБ-93 и БНАБ-РФ.

Следует отметить, что различия ~0,2% в результатах расчетов идентичных моделей (в части описания геометрии и составов) с использованием одних и тех же многогрупповых макроскопических сечений (полученных на одном расчетном задании на CONSYST), но по разным кодам МСNP и ММКК, говорит о величине методической погрешности, связанной с интерпретацией кодом данных по сечениям в групповом приближении. Величина константной составляющей расчетной погрешности, обусловленной переходом от детального представления сечений к групповому приближению, для рассмотренных систем составляет ~0,3%.

Результаты расчета спектральных индексов

Выполнены расчеты спектральных характеристик, измеренных малой камерой деления (МКД) в межтрубном зазоре справа от центральной трубы сборки БФС-61-0 в центральной плоскости активной зоны (рис. 2). В расчетной модели МКД представлялась как цилиндр диаметром 4 мм и высотой 3 см, в соответствии с высотой нанесенного слоя делящегося материала в реальном описании МКД [10].

Базовая версия программы ММКК, помимо результатов расчетов критичности, может выдавать поток в заданной зоне с той же энергетической разбивкой, с

которой системой CONSYST были подготовлены макроскопические сечения. Таким образом, программа ММКК, в отличие от MCNP, не снабжена возможностями вычисления интегралов вида $\int \phi(E)dE$ и $\int \phi(E)\sigma_x(E)dE$. Вычисление таких интегралов требует привлечения дополнительных программ постобработки результатов расчета. Усовершенствованная версия ММКК — ММК-РФ [5, 6], помимо возможности вычисления любых видов свертки с потоком, снабжена независимой геометрической сеткой для выделения цилиндрических или сферических областей регистрации потока нейтронов.

На рисунке 5 показаны результаты расчетов потока нейтронов в цилиндрической области, соответствующей регистрационной области в МКД, по коду MCNP с детальным ходом сечений (библиотека РОСФОНД) и групповым представлением констант (библиотека БНАБ-РФ, 1520 групп), и коду ММКК с групповым представлением констант (библиотека БНАБ-РФ, 1520 групп).

Как видно из графиков, результаты расчётов спектров нейтронов в групповом и детальном представлении хода нейтронных сечений хорошо согласуются. На основании этих энергетических распределений потоков нейтронов могут быть вычислены спектральные индексы.

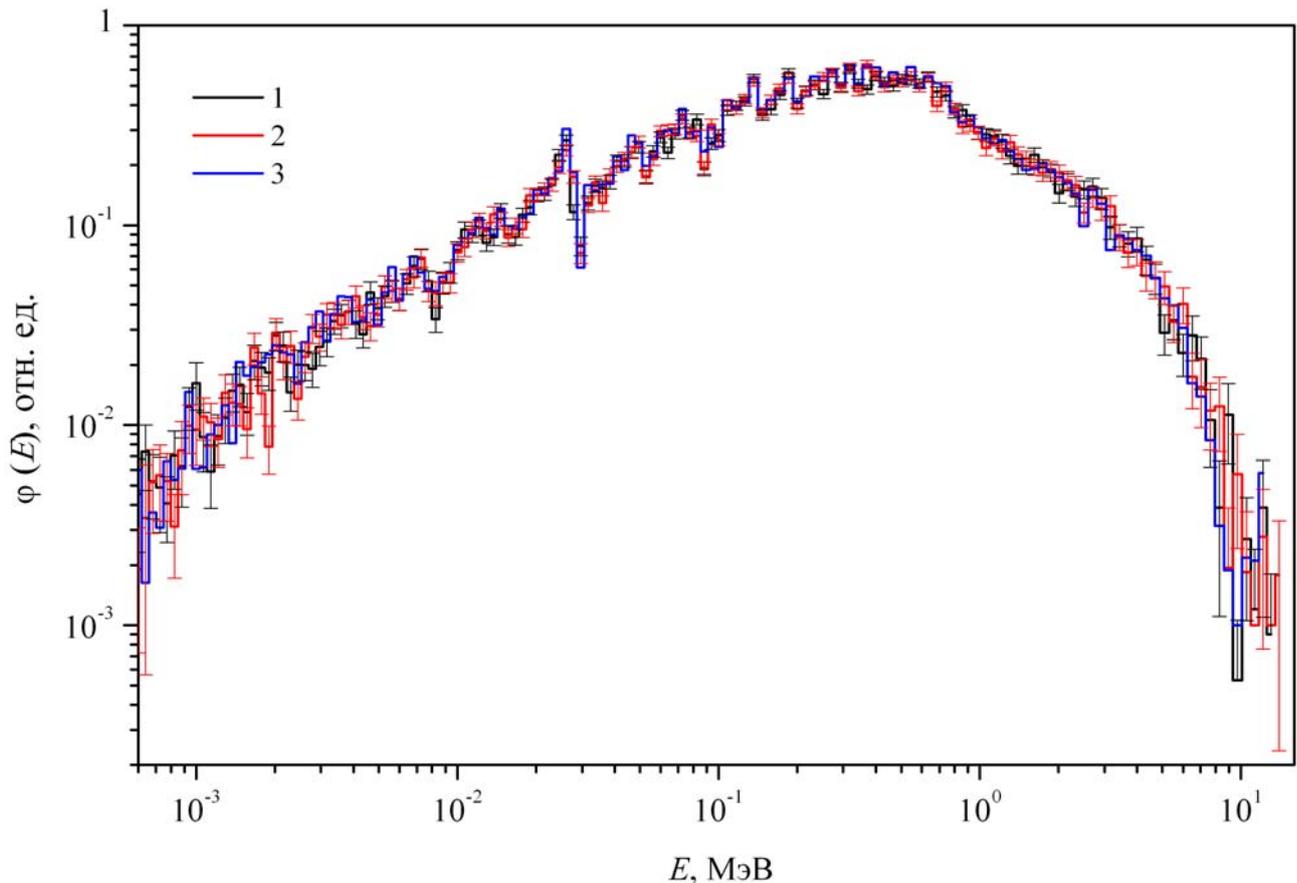


Рис. 5. Спектры нейтронов сборки БФС-61-0, рассчитанные программами: 1 — MCNP с библиотекой РОСФОНД; 2 — MCNP с библиотекой БНАБ-РФ и подгруппами; 3 — ММКК с библиотекой БНАБ-РФ с подгруппами

В таблице 5 приведены результаты расчетов спектральных индексов, измеренных МКД на сборке БФС-61-0, а именно: отношения среднего сечения деления изотопов (^{232}Th , $^{233,238}\text{U}$, ^{239}Pu) к среднему сечению деления ^{235}U и отношения среднего сечения деления минорных актинидов ($^{240,241,242}\text{Pu}$ и ^{241}Am) к среднему сечению деления ^{239}Pu . Расчеты по коду ММК-РФ были выполнены с использованием независимой сетки и автоматизированной свертки потока нейтронов с сечением ($\int \varphi(E)\sigma_x(E)dE$).

Таблица 5. Расчетные значения скоростей деления, измеренные на сборке БФС-61-0

Индекс	Эксперимент	Расчет	
		ММК-РФ	MCNP
$\sigma_f^{238\text{U}}/\sigma_f^{235\text{U}}$	$0,0320 \pm 0,0008$	$0,0307 \pm 0,0001$	$0,0305 \pm 0,0002$
$\sigma_f^{240\text{Pu}}/\sigma_f^{239\text{Pu}}$	$0,2575 \pm 0,0070$	$0,2674 \pm 0,0008$	$0,2646 \pm 0,0020$
$\sigma_f^{242\text{Pu}}/\sigma_f^{239\text{Pu}}$	$0,1883 \pm 0,0050$	$0,1908 \pm 0,0007$	$0,1890 \pm 0,0009$
$\sigma_f^{232\text{Th}}/\sigma_f^{235\text{U}}$	$0,00947 \pm 0,00030$	$0,00730 \pm 0,00003$	$0,00724 \pm 0,00004$
$\sigma_f^{239\text{Pu}}/\sigma_f^{235\text{U}}$	$1,057 \pm 0,015$	$1,0337 \pm 0,0030$	$1,046 \pm 0,005$
$\sigma_f^{\text{Pu}241}/\sigma_f^{\text{Pu}239}$	$1,259 \pm 0,030$	$1,2936 \pm 0,0030$	$1,2885 \pm 0,0060$
$\sigma_f^{\text{U}233}/\sigma_f^{\text{U}235}$	$1,513 \pm 0,030$	$1,4666 \pm 0,0035$	$1,4673 \pm 0,0060$
$\sigma_f^{241\text{Am}}/\sigma_f^{239\text{Pu}}$	$0,1963 \pm 0,0050$	$0,1935 \pm 0,0006$	$0,1965 \pm 0,0009$

Приведенные в таблице 5 данные демонстрируют хорошее согласие результатов расчетов спектральных индексов, полученных по кодам MCNP и ММК-РФ с использованием библиотеки РОСФОНД.

В таблице 6 показаны результаты относительных (в процентах) изменений расчетной величины интегрального сечения деления ($\langle \sigma_f \rangle = \int \varphi(E)\sigma_f(E)dE$) изотопов (^{232}Th , $^{233,235,238}\text{U}$, $^{238,239,240,241,242}\text{Pu}$, $^{241,243}\text{Am}$ и ^{237}Np), обусловленные: 1) переходом от детальной версии библиотеки РОСФОНД к групповой системе CONSYSTRF/БНАБ-РФ (см. столбец 2 и 3 табл. 6); 2) переходом от версии групповой библиотеки БНАБ-93 к БНАБ-РФ (см. столбец 4 и 5 табл. 6). Для ^{238}U помимо интегрального сечения деления $\langle \sigma_f \rangle$ было рассчитано интегральное сечение поглощения $\langle \sigma_a \rangle$. В шестом столбце табл. 6 приведена статистическая погрешность отношения расчетных величин $\langle \sigma_x \rangle$.

Из данных, приведенных в таблице 6, можно сделать выводы, что константная погрешность, обусловленная групповым приближением (переход от библиотеки РОСФОНД к ее групповой версии БНАБ-РФ), для интегральных сечений деления не превышает 2,5%, что сопоставимо со статистической погрешностью расчетов. При этом переход от библиотеки БНАБ-93 к библиотеке БНАБ-РФ для большинства изотопов не приводит к смещению результатов расчетов скоростей деления $\langle \sigma_f \rangle$ (изменения значений $\langle \sigma_f \rangle$ в пределах статистической погрешности

расчетов), за исключением изотопов ^{241}Am и ^{243}Am , расхождения результатов расчетов $\langle\sigma_f\rangle$ для которых достигают 14 – 23%.

Таблица 6. Относительные изменения значений одnogрупповых сечений деления

Изотоп	БНАБ-РФ/РОСФОНД-1, %		БНАБ-93/БНАБ-РФ-1, %		Погрешность расчета, %
	БФС-61-0	БФС-61-2	БФС-61-0	БФС-61-2	
1	2	3	4	5	6
^{232}Th	-1,6	-0,5	2,9	2,3	2,9
^{233}U	-0,1	2,3	-1,4	-0,7	0,8
^{235}U	-0,5	0,5	-3,3	-0,5	0,8
$^{238}\text{U} - \langle\sigma_f\rangle$	-2,5	0,4	6,1	0,9	2,8
$^{238}\text{U} - \langle\sigma_a\rangle$	-1,3	2,3	0,2	-3,9	2,5
^{238}Pu	-0,6	1,5	0,7	0,1	0,9
^{239}Pu	-0,2	1,7	-1,8	-0,5	0,8
^{240}Pu	-2,0	1,6	1,1	-0,6	1,5
^{241}Pu	0,0	2,1	-3,4	-2,5	0,8
^{242}Pu	-2,4	1,2	4,8	3,0	1,6
^{241}Am	-2,9	0,9	16,4	14,3	1,8
^{243}Am	-2,2	0,7	22,8	20,7	1,9
^{237}Np	-0,4	2,1	-2,8	-1,5	1,5
^{244}Cm	0,2	2,3	-3,9	-5,5	1,5
^{245}Cm	-0,1	2,5	-1,1	-0,3	0,8

Анализ полученных результатов

О качестве результатов расчетов по различным библиотекам (РОСФОНД, БНАБ-РФ и БНАБ-93) критичности и измерений спектральных индексов можно судить по данным, приведенным в таблицах 7 и 8.

В столбцах таблицы 7 приведены следующие данные: в третьем — экспериментальные данные, в четвертом — значение экспериментальной погрешности (δ_e), с пятого по седьмой — относительные отклонения между экспериментальными (Э) и расчетными (Р) данными, в восьмом — относительное значение расчетной (статистической) погрешности (δ_p). Как видно из данных табл. 7, для большинства спектральных индексов расчетно-экспериментальные расхождения для всех библиотек лежат в пределах 3σ экспериментальной погрешности.

Исключением являются расчетно-экспериментальные расхождения для отношения сечений деления ^{232}Th к сечению деления ^{235}U и отношения сечений деления ^{238}Pu к сечению деления ^{239}Pu , величина которых в разы превышает величину экспериментальной погрешности. Столь большие значения расхождений обусловлены техническими причинами проведения измерений сечения деления у

данных изотопов. Экспериментальные данные для этих спектральных индексов были исключены из дальнейшего расчетно-экспериментального анализа.

Таблица 7. Расчетно-экспериментальные расхождения для измерений, выполненных на сборках БФС-61

БФС	Измерение	Значение	δ , %	(P/Э-1), %			δ_p , %
				РОСФОНД	БНАБ-РФ	БНАБ-93	
1	2	3	4	5	6	7	8
61-0	$k_{эф}$	1,0003	0,3	-0,3	-0,02	-0,06	0,01
61-1		1,0004	0,3	-0,5	-0,07	-0,1	0,01
61-2		1,0004	0,3	-0,6	-0,3	-0,1	0,01
61-0	$\sigma_f^{238U}/\sigma_f^{235U}$	0,0320	3,0	5,0	-9,9	-1,1	1,9
	$\sigma_f^{240Pu}/\sigma_f^{239Pu}$	0,2575	3,0	2,8	1,2	4,1	1,1
	$\sigma_f^{242Pu}/\sigma_f^{239Pu}$	0,1883	3,0	0,4	-2,0	4,6	1,2
	$\sigma_f^{232Th}/\sigma_f^{235U}$	0,0095	3,0	-23,6	-28,9	-20,5	2,0
	$\sigma_f^{239Pu}/\sigma_f^{235U}$	1,0570	1,5	-1,0	-2,2	-0,7	0,8
	$\sigma_f^{Pu241}/\sigma_f^{Pu239}$	1,2590	3,0	2,3	2,7	1,0	0,8
	$\sigma_f^{U233}/\sigma_f^{U235}$	1,5130	3,0	-3,1	-3,1	-1,2	0,8
	$\sigma_f^{241Am}/\sigma_f^{239Pu}$	0,1963	3,0	0,1	-3,2	14,8	1,4
61-1	$\sigma_f^{238Pu}/\sigma_f^{239Pu}$	0,5412	3,0	12,1	14,6	17,6	0,9
61-2	$\sigma_f^{239Pu}/\sigma_f^{235U}$	1,0520	1,5	-1,4	-2,7	-1,0	0,8
	$\sigma_f^{237Np}/\sigma_f^{239Pu}$	0,2610	3,0	0,2	-1,2	2,3	0,8

В таблице 8 приведена величина интегрального показателя эффективности μ_k^2 , количественно оценивающего эффективность описания системой констант k набора интегральных экспериментов N . Данная величина определяется следующим соотношением [26]:

$$\mu_k^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[\left(\frac{P_n^k - \mathcal{E}_n}{\mathcal{E}_n} \cdot 100 \right)^2 \cdot \frac{1}{\delta_{\mathcal{E}_n}^2 + \delta_{P_n}^2} \right],$$

где N – число экспериментов, n – номер эксперимента, k – идентификатор системы констант.

Величина μ_k характеризует среднее по набору из N экспериментов число стандартных отклонений между экспериментальными и расчетными данными, полученными по системе констант k . Оптимальной системой констант, описывающий набор из N экспериментальных данных, является та система констант, величина интегрального показателя эффективности μ_k^2 для которой меньше или равна единице. Значение μ_k^2 близкое к нулю говорит об отсутствии расчетно-

экспериментальных расхождений, и с помощью системы k в расчетах полностью воспроизводятся результаты измерений.

Таблица 8. Интегральный показатель эффективности систем констант

Тип эксперимента	РОСФОНД	БНАБ-РФ	БНАБ-93
$k_{эф}$	3,09	0,39	0,11
Спектральные индексы (без $k_{эф}$)	0,60	1,65	3,10
Все эксперименты	1,13	1,30	2,28

Как видно из результатов расчетно-экспериментального анализа только измерений критичности ($k_{эф}$, табл. 8), минимальное значение μ^2 наблюдается для библиотеки БНАБ-93, что объяснимо, поскольку планирование экспериментов на сборках БФС-61 выполнялось с использованием результатов расчетов по данной библиотеке. По результатам расчетно-экспериментального анализа всей совокупности измерений, выполненных на серии сборок БФС-61, оптимальной системой констант является библиотека РОСФОНД.

Заключение

В работе обсуждены особенности подготовки взаимосогласованных расчетных моделей для прецизионных и инженерных кодов и проведения на их основе расчетов нейтронно-физических характеристик критическихборок БФС на примере серии измерений, выполненных на трех критических конфигурациях БФС-61.

Продемонстрированы улучшенные функциональные возможности актуализированного программного и константного обеспечения для расчетно-экспериментального анализа интегральных экспериментов на сборках БФС, позволяющих существенно сократить время и минимизировать вероятность возникновения ошибок при составлении моделей, создавать взаимосогласованные модели для прецизионных и инженерных кодов:

- Новые возможности системы CONSYST-RF позволяют значительно упростить и автоматизировать составление расчетных заданий для учета гетерогенных эффектов блокировок сечений, избежать привлечения дополнительных программ.

- Программный комплекс ММК-РФ имеет функцию накладываемой сетки, включает в себя аналогичный ММКК геометрический модуль, позволяет проводить расчет в многогрупповом приближении, с детальным слежением хода сечений и комбинированным способом. В ММК-РФ были устранены имеющиеся в базовой версии кода ММКК недоработки, не позволявшие проводить вычисления спектральных характеристик и пространственных распределений скоростей реакций, измеряемых на сборках БФС. Поскольку код ММК-РФ имеет преимущества по скорости расчета перед кодом MCNP, благодаря специализированному геомет-

рическому модулю, то он может выступать в качестве отечественного прецизионного кода расчетного сопровождения экспериментов на критических сборках БФС.

Практическая реализация методически прозрачной процедуры оценки методической и константной компонент погрешности расчёта в соответствии с Положением РБ-061-11 на рассмотренном экспериментальном материале и с использованием разработанных взаимосогласованных моделей позволяет сделать следующие выводы:

– Константная погрешность, обусловленная групповым приближением (переход от библиотеки РОСФОНД к ее групповой версии БНАБ-РФ), для критических конфигурации сборки БФС-61 не превышает 0,3% в критичности. Для спектральных индексов смещения результатов лежат в пределах статистической погрешности расчетов. При этом переход от библиотеки БНАБ-93 к библиотеке БНАБ-РФ приводит к уменьшению значения критичности не более чем на 0,2%.

– Методическая погрешность, связанная с интерпретацией прецизионным кодом данных по сечениям в групповом приближении, составила ~0,2%. Оценена эта погрешность на основании сопоставления результатов расчетов по кодам MCNP и ММКК для идентичных моделей (в части описания геометрии и составов), с использованием одних и тех же многогрупповых макроскопических сечений (полученным на одном расчетном задании на CONSYST).

– По результатам расчетно-экспериментального анализа всей совокупности измерений, выполненных на серии сборок БФС-61, оптимальной системой констант является библиотека РОСФОНД.

Таким образом, выполненные программные разработки, созданные взаимосогласованные расчетные модели для кодов Монте-Карло в групповом и детальном представлении нейтронных сечений и проведенный расчетный анализ наглядно демонстрируют процедуру реализации методически прозрачной и воспроизводимой процедуры оценки методической и константной компонент погрешности расчёта в соответствии с Положением РБ-061-11.

Список использованных источников

1. РБ-061-11 «Положение о проведении верификации и экспертизы программных средств по направлению «Нейтронно-физические расчеты».
2. “MCNP – A General Monte Carlo Neutron-Particle Transport Code“. Version 5. X-5 Monte Carlo Team, Los Alamos National Laboratory, April 2003.
3. Gomin E.A, Gurevich M.I., Maiorov L.V. Status of MCU. Programme and Book of Abstracts. Advanced Monte Carlo on Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications, Monte Carlo 2000, October 23 – 26, 2000, pp. 2003 – 2004, Lisbon, Portugal.
4. Блыскавка А.А., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Программный комплекс CONSYST/ММККЕНО для расчета ядерных реакторов методом

- Монте-Карло в многогрупповом приближении с индикатрисами рассеяния в Pn-приближении: Препринт ФЭИ-2887. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2001.
5. Жердев Г.М., Кислицина Т.С., Николаев М.Н. Система комбинированных констант РОКОКО. Современное состояние, результаты тестирования с геометрическим модулем ММК// Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2018. № 2. С. 47-57.
 6. Жердев Г.М., Кислицина Т.С., Мантуров Г.Н. Комплекс программ ММК-РФ для прецизионных расчетов нейтронных и гамма-полей с константами БНАБ-РФ и РОСФОНД // Сборник тезисов докладов. – V МНТК НИКИЭТ-2018, С. 241.
 7. Абагян Л.П., Базазянц Н.О., Бандаренко И.И., Николаев М.Н. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. — М., Атомиздат, 1964.
 8. Николаев М.Н., Рязанов Б. Г., Савоськин М.М., Цибуля А.М. Многогрупповое приближение в теории переноса нейтронов. — М., Энергоатомиздат, 1984.
 9. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Программа подготовки констант CONSYST. Описание применения: Препринт ФЭИ-2828. — Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2000.
 10. Rozhikhin Y., Semenov M. BFS-61 Assemblies: Critical Experiments of Mixed Plutonium, Depleted Uranium, Graphite and Lead with Different Reflectors, ICSBER, NEA/NSC/DOC/(95)03/VI.
 11. Rozhikhin Y., Semenov M. BFS-61 Assemblies: Experimental Model of Lead-Cooled Fast Reactors with Core of Metal Plutonium-Depleted Uranium Fuel and Different Reflectors. BFS1-LMFR-EXP-002, IPRhEP, NEA/NSC/ DOE(2006).
 12. Андрианова О.Н., Мантуров Г.Н., Рожихин Е.Ю. Применение неаналоговых методов в коде MCNP для расчетного анализа измерений скоростей реакций на критических сборках БФС // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2016. № 2. С. 66—76.
 13. Андрианова О.Н., Дулин В.А., Михайлова И.В., Андрианов А.А. Расчетно-экспериментальный анализ скорости реакций Pu, Np, Am, Cm на критических стендах БФС // Атомная энергия. 2017. Т. 122. № 5. С. 243—248.
 14. Свидетельство № 2016612435 от 26.02.2016 о гос. регистрации программы для ЭВМ SUBGRAN / Жердев Г.М., Мантуров Г.Н., Цибуля А.М.
 15. Андрианова О.Н. Методические аспекты оценки составляющей погрешности в расчетах реакторных характеристик, обусловленной резонансной структурой нейтронных сечений // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2017. № 1. С. 74—86.
 16. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Система групповых констант БНАБ-93. Часть 1: Ядерные константы для расчета нейтронных и фотонных полей излучений // Вопросы атомной науки и техники: Серия: Ядерные константы. 1996. Вып. 1. С. 59.

17. Свидетельство № 2016612865 от 11.03.2016 о гос. регистрации программы для ЭВМ CONSYST-RF / Кощеев В.Н., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Семенов М.Ю., Цибуля А.М.
18. Свидетельство № 2014612958 от 13.03.2014 о гос. регистрации программы для ЭВМ CONSYST-БР / Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М., Кощеев В.Н., Семенов М.Ю.
19. Свидетельство № 2013612298 от 13.03.2014 о гос. регистрации программы для ЭВМ CONSYST / Мантуров Г.Н., Цибуля А.М., Николаев М.Н., Кощеев В.Н., Семенов М.Ю.
20. Кощеев В.Н., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Библиотека групповых констант БНАБ-РФ для расчетов реакторов и защиты // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2014. № 3. С. 93—101.
21. Андрианова О.Н., Головки Ю.Е., Рожихин Е.В., Якунин А.А. Верификация библиотеки констант БНАБ-РФ на модельных задачах и специально отобранных бенчмарк-экспериментах. Ядерная физика и инжиниринг. 2012. Т. 3. № 2. С. 120.
22. Андрианова О.Н., Головки Ю.Е., Мантуров Г.Н. Верификация константного обеспечения РОСФОНД/БНАБ-РФ в расчетах международного теста OECD/NEA по критической безопасности систем с МОКС-топливом. Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2018. № 3. С. 160-170.
23. Жердев Г.М., Николаев М.Н., Блыскавка А.А. Аннотация вычислительной системы СКАЛА: Препринт ФЭИ-2960. Обнинск, ГНЦ РФ – ФЭИ. 2001.
24. ROSFOND — Russian neutron library. (2010) Available at: <https://www.nndc.bnl.gov/exfor/endl00.jsp> (01.04.2019).
25. Свидетельство № 2014612579 от 28.02.2014 о гос. регистрации программы для ЭВМ ММКС/ Блыскавка А.А., Раскач К.Ф., Жемчугов Е.В., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М., Семенов М.Ю.
26. Усачев Л.Н., Бобков Ю.Г. Теория возмущений и планирование эксперимента в проблеме ядерных данных для реакторов. — М., Атомиздат, 1980.

Подписано к печати 10.07.2019. Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 0,8. Уч.-изд. л. 1,3.
Тираж 45 экз. Заказ № 91.

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