

АО «ГНЦ РФ – ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМЕНИ А.И. ЛЕЙПУНСКОГО»

На правах рукописи

УДК: 621.039.51



Мантуров Геннадий Николаевич

**МЕТОДИЧЕСКОЕ – КОНСТАНТНОЕ И ПРОГРАММНОЕ  
ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ  
БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ И ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ  
РАСЧЕТНЫХ ПРЕДСКАЗАНИЙ**

Специальность 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая  
проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Обнинск – 2017

Работа выполнена в АО «Государственный научный центр  
Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени  
А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
эксперт-начальник лаборатории  
АО «ГНЦ НИИАР»

Жемков Игорь Юрьевич

доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник  
НИЦ «Курчатовский институт»

Зизин Михаил Николаевич

доктор технических наук,  
начальник отдела ФГУП  
«НИТИ им.А.П.Александрова»

Ельшин Александр Всеволодович

Ведущая организация:

Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени и ордена  
Труда ЧССР опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС» (АО ОКБ  
«ГИДРОПРЕСС», г.Подольск)

Защита диссертации состоится «24» октября 2017 г. в 14 час 00 мин.  
на заседании диссертационного совета Д 520.009.06 при Национальном  
исследовательском центре «Курчатовский институт» по адресу 123182 г.  
Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального  
исследовательского центра «Курчатовский институт» и на сайте  
[www.nrcki.ru](http://www.nrcki.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Отзывы и замечания на автореферат в двух экземплярах, заверенные  
печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя секретаря  
диссертационного совета.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук



А.С.Колокол

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

Диссертационная работа посвящена решению одной из важнейших научно-технических проблем в реакторной физике, связанной с проведением надежных, сертифицированных, высокоточных расчетов нейтронно-физических характеристик быстрых реакторов и радиационной защиты, параметров ядерного топливного цикла, включая расчеты ядерной и радиационной безопасности, с использованием верифицированного универсального константного обеспечения, созданного на базе национальной библиотеки файлов оцененных нейтронных данных (РОСФОНД) и библиотек многогрупповых констант (БНАБ) – на единой методической основе. Это обеспечивает прозрачность процедуры получения используемых в расчетах данных и получаемых результатов, надежность их верификации и получение гарантированной точности рассчитываемых характеристик.

Рассматриваемые сейчас критерии и требования к Поколению 4 (G-IV) ядерных технологий включают в себя как непосредственно сам реактор, так и переработку (рециклирование) ядерного топлива, что предъявляет более высокие требования к эксплуатационным показателям в области обеспечения устойчивого развития, конкурентоспособности, безопасности и надежности, защиты от распространения ядерного оружия. На сегодняшний день доказана возможность трансмутации гражданского и военного плутония в составе МОКС-топлива в быстрых реакторах-размножителях. Показано, что быстрые реакторные системы завтрашнего дня смогут осуществлять трансмутацию больших количеств не только плутония, но и младших актинидов. В России, Японии, США, Франции, Евратом, Южной Корее, Китае развиваются проекты реакторов на быстрых нейтронах (SFR) с натриевым теплоносителем в замкнутом ядерном топливном цикле, обеспечивающим эффективное обращение с актинидами и воспроизводство делящегося материала. В России развиваются инновационные проекты реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым (БРЕСТ) или свинцово-висмутовым

(СВБР) жидкометаллическим теплоносителем и замкнутым ядерным циклом.

Разработка реакторов с неизменяемым в процессе кампании чрезвычайно малым запасом регулируемой реактивности, не превышающим  $\beta_{\text{эфф}}$  (т.е. менее 0,4%), обеспечивающим условия так называемой “естественной безопасности”, ставит принципиально новую задачу – обеспечить высокую точность не только  $k_{\text{эфф}}$ , но и изменения  $k_{\text{эфф}}$  с выгоранием с учётом переработки ОЯТ и перегрузок активной зоны. Это требует резкого уменьшения величин погрешности расчётов, как в начале кампании, так и в конце (в особенности) когда состав топлива меняется заметно. Эта погрешность расчета практически целиком определяется погрешностями используемых нейтронно-физических констант (так называемая «константная» составляющая погрешности).

В связи с этими и постоянно возникающими новыми задачами, данная проблема совершенствования систем ядерно-физических констант и программ подготовки констант к практическим расчетам имеет важнейшее значение, т.к. проведение всех проектных и предпроектных, оптимизационных и поисково-исследовательских расчетов требует применения сертифицированных ядерных констант и программных средств. Так, хотя основные требования к топливной загрузке реакторной установки (РУ) определяются техническим заданием на РУ, однако фактические параметры загрузки (изотопный состав урана и плутония, его массовая доля в топливе, загрузка топлива в ТВС и др.) могут отличаться от проектных значений в пределах технологических допусков. К тому же, нейтронно-физические расчеты так же имеют погрешность. Очевидно, если не предусмотреть специальных мер, все это может существенно повлиять на нейтронно-физические характеристики (НФХ) реактора, снизить уровень его безопасности.

Повышение требований к эксплуатационным показателям ставит задачу повышения точности расчетного предсказания характеристик проектируемых и работающих реакторных установок, расчетов в

обоснование их безопасности, расчетов в обоснование ядерной и радиационной безопасности при обращении с ядерным топливом при его производстве, транспортировке и хранении.

Решение этих задач ведет, в конечном счете, к повышению надежности, безопасности и экономичности, как самих реакторных установок, так и всех объектов ядерной энергетики и способствует повышению независимости и конкурентоспособности Российских технологий на мировом рынке.

### **Цель работы**

Цель работы – разработка методик, алгоритмов и вычислительных программ, совокупность которых представляет собой замкнутую методическую базу – систему программ и банков данных CONSYST/БНАБ, предназначенную для проведения нейтронно-физических расчетов реакторных систем с использованием различных расчетных программ (вычислительных кодов), как инженерного, так и прецизионного класса (по методу Монте-Карло), расчетов линейных и дробно-линейных функционалов потоков нейтронов и гамма-квантов. К рассчитываемым функционалам относятся важнейшие характеристики делящихся и реакторных систем: эффективный коэффициент размножения ( $k$ -eff), эффективность органов СУЗ, пустотный эффект реактивности, коэффициент воспроизводства (КВ), скорости различных процессов взаимодействия нейтронов и гамма-квантов с веществом, энерговыделение, скорости наработки целевых изотопов, трансмутации минорных актинидов, и др.

Целью работы являлась также разработка и развитие методик, алгоритмов и программ, представляющих собой замкнутую методическую базу – систему кодов и архивов данных ИНДЭКС, включая библиотеки результатов экспериментов, расчетов, ковариационных данных и комплекс программ для статистического анализа расчетно-экспериментальных результатов, обеспечивающие численную оценку величин погрешности рассчитываемых характеристик за счет имеющихся неопределенностей в используемых в расчетах ядерно-физических константах. Наряду с этим

поставлена задача повышения точности расчетных предсказаний (и снижения величин погрешности) за счет привлечения результатов уже проведенных или планируемых интегральных и реакторно-физических экспериментов и, в том числе, за счет корректировки ядерно-физических констант.

Для достижения поставленных целей решены следующие задачи:

- разработана система константного обеспечения CONSYST/БНАБ и создан вычислительный программный комплекс CONSYST для внедрения банков многогрупповых констант БНАБ-93 и БНАБ-РФ в практические расчеты физических характеристик реакторных систем различного класса;
- созданы наборы интерфейсных программных модулей для обеспечения константами вычислительных кодов, как инженерного, так и прецизионного класса;
- выполнена верификация и валидация разработанной системы константного обеспечения CONSYST/БНАБ с использованием библиотек многогрупповых констант БНАБ-93 и БНАБ-РФ (в связке с нейтронно-физическими кодами TRIGEX, ММКК и MCNP), с привлечением результатов интегральных и реакторно-физических экспериментов;
- разработана система программ и архивов данных ИНДЭКС в виде вычислительного программного комплекса CORE, библиотек результатов экспериментов и расчетов LEMEX и LSENS, и ковариационных матриц погрешностей констант LUND, обеспечивающие численную оценку величин погрешности рассчитываемых реакторно-физических характеристик за счет имеющихся неопределенностей в используемых в расчетах ядерно-физических констант, и возможность снижения этих погрешностей за счет привлечения результатов уже интегральных реакторно-физических экспериментов, в том числе, за счет корректировки ядерно-физических констант;
- выполнены оценки константной составляющей погрешности в расчетах нейтронно-физических характеристик действующих и перспективных моделей быстрых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем, и

определены наиболее значимые источники погрешности.

### **Положения, выносимые на защиту**

- Система константного обеспечения CONSYST/БНАБ, на основе комплекса вычислительных программ CONSYST и банков данных БНАБ-93 и БНАБ-РФ, для обеспечения надежными ядерно-физическими константами нейтронно-физических расчетов реакторных систем с использованием различного класса расчетных программ (вычислительных кодов), как инженерных - на основе диффузионного приближения, так и прецизионных - на основе кинетического приближения и метода Монте-Карло, что обеспечивает прозрачность процедуры получения расчетных результатов, надежность их верификации и получение гарантированной точности рассчитываемых характеристик.
- Программный комплекс CONSYST для обеспечения современными константами, такими как БНАБ-93 и БНАБ-РФ, нейтронно-физических расчетов реакторов и радиационной защиты, включая расчеты ядерной безопасности.
- Результаты верификации и валидации разработанной системы константного обеспечения CONSYST/БНАБ в расчетах многочисленных бэнчмарк экспериментов с использованием прецизионных вычислительных кодов.
- Система программ и архивов данных ИНДЭКС, в виде программного комплекса CORE и библиотек результатов экспериментов и расчетов LEMEX и LSENS, и ковариационных матриц погрешностей LUND, обеспечивающие численную оценку величин погрешности рассчитываемых реакторно-физических характеристик за счет имеющихся неопределенностей в используемых в расчетах ядерно-физических константах, и, если необходимо, корректировку констант.
- Вычислительный программный комплекс CORE для статистического анализа расчетно-экспериментальных расхождений, корректировки

констант и оценки расчетных погрешностей.

- Библиотека LUND ковариационных матриц погрешностей 28-ми групповых констант БНАБ-93.
- Библиотека LEMEX результатов экспериментов и их расчетного анализа.
- Оцененные величины константной составляющей погрешности в результатах расчетов важных нейтронно-физических характеристик моделей перспективных быстрых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем.

### **Научная новизна**

- Впервые создана совокупность методик, алгоритмов, вычислительных программ и специализированных банков данных в виде системы программ и библиотек многогрупповых констант CONSYST/БНАБ, которые представляют собой замкнутую методическую базу для обеспечения надежными, верифицированными константами нейтронно-физических расчетов быстрых реакторов и радиационной защиты, включая расчеты ядерной безопасности.
- Впервые создана совокупность методик, алгоритмов, вычислительных программ и специализированных банков данных в виде системы программ и архивов ИНДЭКС, которые представляют собой замкнутую методическую базу для обеспечения численной оценки величин погрешности рассчитываемых реакторно-физических характеристик.
- Разработанные алгоритмы и программные комплексы позволяют проводить и получать научно обоснованные оценки расчетных погрешностей нейтронно-физических характеристик быстрых реакторов с использованием единой методической базы на основе файлов оцененных нейтронных данных РОСФОНД и библиотек многогрупповых констант БНАБ-РФ. Ранее такие расчеты были невозможны.
- Разработанные алгоритмы не имеют отечественных аналогов. От имеющихся зарубежных аналогов они отличаются тем, что приспособлены к

алгоритмам и формам представления данных, используемым в отечественных программах расчета нейтронно-физических характеристик быстрых реакторов.

### **Практическая значимость**

– Разработанные алгоритмы и программные комплексы являются обоснованной, верифицированной научно-методической базой для проведения массовых высокоэффективных расчетов, как инженерными, так и прецизионными методами (диффузионными, на основе кинетического приближения и методом Монте-Карло).

– Разработанные методики на основе программного комплекса CONSYST и библиотек многогрупповых констант БНАБ (БНАБ-93 и БНАБ-РФ) внедрены в российские коды расчетов НФХ активных зон быстрых реакторов, в расчеты ядерной безопасности при обращении с топливом и моделировании активных зон быстрых реакторов на физических стендах БФС. Унификация привязки расчетных кодов к константной базе на единой методической основе обеспечивает прозрачность процедуры получения расчетных результатов, надежность их верификации и получение гарантированной точности рассчитываемых характеристик.

– Созданные методики на основе системы программ и архивов данных ИНДЭКС, которая в качестве составляющих элементов содержит программный комплекс CORE и банки данных различного назначения LUND, LEMEX и др., позволяют обеспечить решение задачи о повышении точности расчетных предсказаний физических характеристик проектируемых реакторных установок по результатам интегральных экспериментов (в том числе, экспериментов на критических и подкритических экспериментальных физических стендах и работающих реакторах, экспериментов по защите от излучений). Решение этой задачи ведет, в конечном счете, к повышению надежности, безопасности и экономичности реакторных установок и установок внешнего топливного цикла.

– С использованием развитой методики на основе системы программ и

архивов ИНДЭКС получены величины константной погрешности расчетов с учетом результатов выполненных интегральных и макроскопических экспериментов на критических сборках и реакторах. Рассчитаны отдельные вклады в погрешность расчета величины  $K_{эфф}$  для моделей активных зон перспективных быстрых реакторов от различных нейтронных данных, как без учета (уровень «микроданных»), так и с учетом интегральных экспериментов. Рассмотрение величин этих вкладов и определение наиболее значимых дает возможность поставить задачу о повышении точности расчетов путем планирования дополнительных экспериментов, направленных на уточнение тех или иных ядерно-физических констант.

– Разработанные алгоритмы на основе системы кодов и архивов данных ИНДЭКС могут применяться наряду с другими известными алгоритмами (например, метод GRS). Однако, с точки зрения его использования, на сегодня он не имеет известных аналогов. Использование этого алгоритма является ключевым фактором при оценке константной составляющей погрешности расчетов с учетом результатов выполненных интегральных и макроскопических экспериментов на критических сборках и реакторах.

– Надо отметить, что необходимость подготовки надежных и сертифицированных нейтронных и фотонных ядерно-физических данных возникает и при анализе переходных процессов в ядерных и электроядерных реакторных установках при обосновании их безопасности, при оптимизационных расчетах, при решении многих практических задач. Все эти расчеты могут быть обеспечены константами с использованием системы CONSYST/БНАБ. Обоснование погрешностей рассчитываемых характеристик может быть обеспечено путем использования методик системы кодов и архивов данных ИНДЭКС.

#### **Достоверность полученных результатов**

Разработанные алгоритмы, подпрограммы и программный комплекс CONSYST, и его современный аналог CONSYST-RF, прошли тестирование, как на представительных наборах тестовых задач, так и в практических

задачах. Разработанные методики внедрены в российские инженерные коды TRIGEX, JAR-FR, ГЕФЕСТ – для расчетов активных зон реакторов типа БН, FACT-BR – для расчетов реактора БРЕСТ-300, REACTOR – для расчетов реактора СВБР-100, отечественные комплексы программ КАСКАД и КАТРИН – для расчетов радиационной защиты, в программы PMSNSYS и KINXYZ через формат GNDL для расчетов СВБР, в код ММКК (ММККЕНО) – для прецизионных расчетов реакторов методом Монте-Карло, оценки ядерной безопасности, и при моделировании активных зон быстрых реакторов на физических стендах БФС. Все эти коды обеспечены нейтронно-физическими константами с помощью системы CONSYST/БНАБ. Верификация расчетных кодов, как и используемых констант БНАБ-93 и БНАБ-РФ, проводится именно при условии переработки этих констант с помощью программ комплекса CONSYST.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов подтверждена путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных, результатами работ, опубликованных в ведущих научных журналах и в трудах отечественных и международных конференций.

По результатам работы получено 14 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных ядерно-физических констант.

#### **Личный вклад автора**

Диссертационная работа содержит расчетные и прикладные результаты исследований, выполненные автором в ГНЦ РФ-ФЭИ имени А.И.Лейпунского в течение 1974 - 2016 годов. Основная часть научных результатов, связанных с положениями, выносимыми на защиту, получена автором лично. В случае совместных работ, относящихся к этим положениям, автору принадлежала ведущая роль. В работах прикладного характера, связанных с использованием разработанных методов, автор принимал участие в постановке задачи, расчетах и анализе результатов.

– Разработана система константного обеспечения CONSYST/БНАБ, предназначенная для обеспечения нейтронно-физических расчетов

реакторов, представляющая собой замкнутую методическую базу на основе комплекса вычислительных программ CONSYST и банков данных БНАБ-93 и БНАБ-РФ.

- Создан программный комплекс CONSYST для обеспечения современными константами БНАБ-РФ нейтронно-физических расчетов реакторов и радиационной защиты, расчеты ядерной безопасности.
- Разработана система программ и архивов данных ИНДЭКС и создан программный комплекс CORE для статистического анализа расчетно-экспериментальных расхождений, корректировки констант и оценки погрешностей;
- Создана библиотека LUND ковариационных матриц погрешностей 28-ми групповых констант БНАБ;
- Создана библиотека LEMEX результатов экспериментов;
- Проведена верификация и валидация системы константного обеспечения CONSYST/БНАБ в расчетах экспериментальных бэнчмарк моделей в связке с нейтронно-физическими кодами TRIGEX, ММКК и MCNP, с использованием библиотек групповых констант БНАБ-93 и БНАБ-РФ;
- Получены оценки величин константной составляющей погрешности результатов нейтронно-физических расчетов моделей быстрых реакторов. Проанализированы и выявлены основные источники погрешности расчетов перспективных моделей быстрых реакторов.

### **Апробация**

Материалы диссертации были представлены и обсуждались на научных конференциях и семинарах:

- на Международных конференциях
  - Radiation Shielding 'ICRS-12 & RPSD-2012'. Japan
  - Radiation Shielding & 19<sup>th</sup> Topical Meeting of the Radiation Protection and Shielding Division of the ANS ICRS-13 & RPSD-2016, France
  - Global-2015: Nuclear Fuel Cycle for a Low-Carbon Future, Франция
  - PHYSOR 2004, PHYSOR 2014, PHYSOR 2016, USA

- Nuclear Data for Science and Technology: Germany – 1991, USA – 1994 & 2005, France – 2007, USA – 2013, Belgium – 2016
- Nuclear Criticality Safety ICNC-2003, ICNC-2007
- International Congress on Advances in Nuclear Power Plants Korea 2005
- Mathematics, Computational Methods and Reactor Physics (M&C), 2009
- WONDER 2012 - 3rd International Workshop on Nuclear Data Evaluation for Reactor Applications". France
- на Российских научных конференциях и семинарах
  - Межведомственном семинаре «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» (НЕЙТРОНИКА), Обнинск, 2001-2016 гг.
  - Международной юбилейной конференции «БФС-2012»
  - 10-й Юбилейной Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», 2015
  - Международной научно-технической конференции «МНТК-2016»: «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики».

### **Публикации**

По теме диссертации опубликованы 68 публикаций, из них: 37 статей в ведущих российских и зарубежных журналах (21 из них входят в Перечень ВАК), главы в 3-х коллективных монографиях, 14 статей в рецензируемых сборниках трудов российских и международных конференций. Получено 14 свидетельств о государственной регистрации баз данных и программ для ЭВМ. В базе данных Scopus зарегистрирована 31 работа, 33 работы зарегистрированы в РИНЦ. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, одного приложения, списка литературы из 115 наименований и содержит 202 страницы, 31 таблицу и 35 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность, определены цели и задачи исследований, изложены предпосылки и краткая история исследований по теме диссертации, сформулированы научная новизна работы, ее практическая значимость, личный вклад автора и основные положения, выносимые на защиту.

В ГЛАВЕ 1 описаны разработанные программные средства в виде комплекса программ и библиотек данных, объединенных в систему CONSYST/БНАБ, для обеспечения нейтронно-физическими константами расчетов быстрых реакторов и радиационной защиты, включая расчеты параметров ядерной и радиационной безопасности и топливного цикла.

В разделах 1.1 и 1.2 дано описание реализованных методических подходов. Описана схема константного и программного обеспечения расчетов быстрых реакторов и взаимодействие программ подготовки констант с расчетными кодами, которая представлена на рисунке 1.

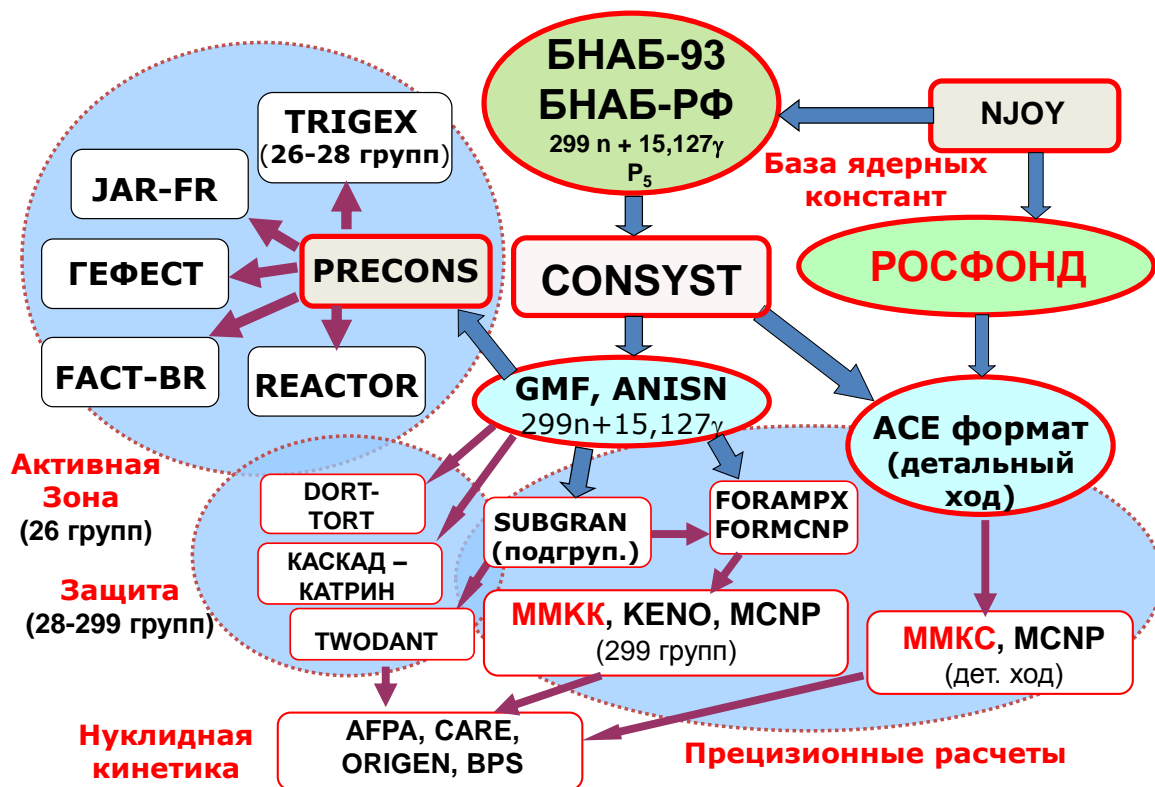


Рисунок 1 – Схема константного обеспечения расчетов быстрых реакторов и взаимодействие программ подготовки констант с расчетными кодами

Программа CONSYST является базовой расчетной и управляющей программой в системе. Передача данных от программы CONSYST ко всем расчетным программам осуществляется через внутренний обменный файл данных GMF («General Micro Format»).

Обеспечение расчетных кодов необходимыми наборами констант осуществляется с использованием специально разработанных для этой цели программ и процедур комплекса.

**В разделах 1.3 – 1.5** описана структура программы CONSYST, реализованные алгоритмы расчета заблокированных констант, организация вычислений, блок схема программы и описание входящих в её состав модулей. В новой версии комплекса программ CONSYST-RF подготовки констант к нейтронно-физическим расчетам с использованием новой системы многогрупповых констант БНАБ-РФ, как основные, используются алгоритмы, реализованные в предыдущей версии программы переработки констант CONSYST, предназначенной для обработки констант БНАБ-93, но с существенными модификациями. При этом в полной мере учтен опыт эксплуатации БНАБ-93 и расширено использование возможностей компьютеров и новых операционных систем.

Одной из наиболее важных особенностей программных средств, предназначенных для расчетов быстрых реакторов, является обеспечение единой привязки к константной базе на единой методической основе, что обеспечивается использованием исходных библиотек многогрупповых констант БНАБ (БНАБ-93 и БНАБ-РФ), модулями и программами комплекса CONSYST подготовки данных к физическим расчетам. Успех этому обеспечивает тесное сотрудничество разработчиков программных средств.

**В разделе 1.6** дано описание использования программы CONSYST в инженерных кодах с помощью программного модуля PRECONS.

**В разделе 1.7** описано использование программы CONSYST в в расчетах Монте-Карло. При подготовке констант к расчетам по программе

ММКК (первоначальное название ММККЕНО) с константным обеспечением CONSYST/БНАБ используются программные модули: CONSYST, FORAN, SUBGRAN, FORAMPX. При расчетах по MCNP используются автономные программные модули системы: CONSYST, FORAN, SUBGRAN, FORAMPX и FORMCNP. Дано содержание библиотек констант БНАБ-93 и БНАБ-РФ.

**В ГЛАВЕ 2** дано описание разработанной системы программ и архивов данных ИНДЭКС, предназначенной для выполнения работ по анализу наблюдаемых расхождений между расчетными и экспериментальными данными, устранению этих расхождений путем алгоритмической корректировки нейтронно-физических ядерных констант (групповых сечений отдельных нуклидов) с использованием математико-статистического метода максимального правдоподобия, коэффициентов чувствительности и ковариационных матриц погрешностей, и для оценки константной составляющей погрешности расчетов нейтронно-физических характеристик (НФХ) быстрых реакторов.

**В разделе 2.1** дано описание системы программ и архивов ИНДЭКС. Структура системы и её элементы представлены на рисунке 2.

Система ИНДЭКС содержит специализированные базы данных – компьютерные архивы экспериментальной и расчетной информации:

LEMEX – библиотека оцененных “benchmark” интегральных и макроскопических реакторных экспериментов (содержит результаты измерений, выполненных на хорошо известных стандартных спектрах, различных физических критических стендах, действующих реакторах, а также результаты расчетов измеренных величин вместе со всеми введенными поправками и их погрешностями);

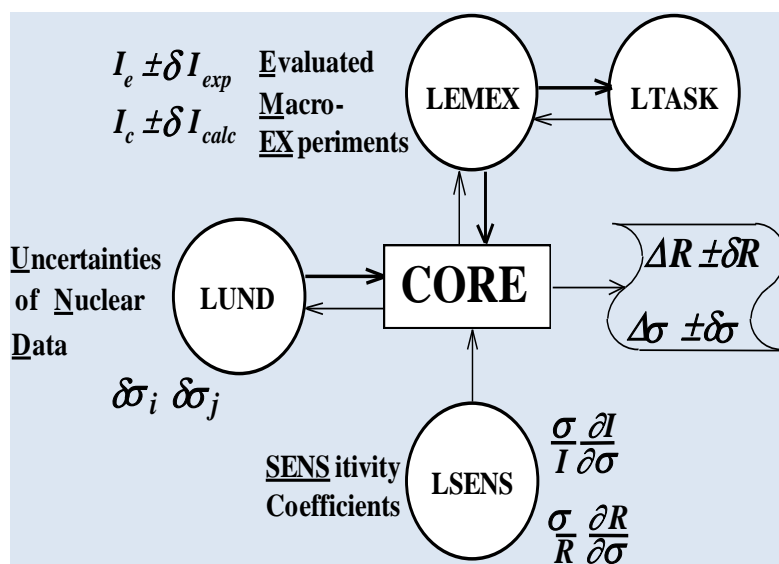
LDESC – библиотека описаний условий проведения экспериментов;

LTASK – библиотека описаний расчетных моделей экспериментов; содержит файлы заданий на расчет по программам CRAB, TWODANT, TRIGEX, ММК;

LUND – библиотека ковариационных матриц погрешностей 28-ми групповых констант БНАБ;

LSENS – библиотека коэффициентов чувствительности измеренных величин и важных физических характеристик тестовых моделей к различным групповым константам и некоторым параметрам реактора.

## Система программ и архивов ИНДЭКС



**LEMEX:** библиотека результатов около 400 экспериментов на критических сборках

**LTASK:** библиотека расчетных заданий, включая модели реакторов: БН-600, БН-800, БН-1200, БРЕСТ-300, СВБР, СЕФР, и др.

**LUND:** библиотека ковариационных матриц погрешностей 28-ми групповых констант >40 нуклидов

**CORE:** программный комплекс статистического анализа результатов экспериментов и оценка погрешностей расчетов

**LSENS:** библиотека коэффициентов чувствительности измеренных величин и физических характеристик моделей из библиотеки LEMEX к расчетным параметрам

Рисунок 2 – Структура программ и архивов системы ИНДЭКС

Для проведения статистического анализа наблюдаемых расхождений между расчетными и экспериментальными результатами, оценки расчетной погрешности и корректировки групповых констант на основе метода максимального правдоподобия система ИНДЭКС включает в себя специально разработанный программный комплекс CORE.

В разделах 2.2 – 2.4 описаны методики анализа и оценки константной погрешности. В основе заложенной в программном комплексе CORE методики лежит метод максимального правдоподобия (Maximum Likelihood Method) или ещё его называют «обобщенный метод наименьших квадратов» (Generalized Linier List Square Method). Рассмотрены вопросы повышения точности расчетного предсказания характеристик проектируемых и

работающих реакторных установок. Важнейшую роль при этом играют интегральные эксперименты, проводимые на реакторах и физических стендах, специально спланированные для целей тестирования и повышения точности методов и программ расчета быстрых реакторов.

Методика учета интегральных экспериментов состоит в следующем.

Пусть  $C$  – есть вектор исходного набора констант,  $I_3$  – есть вектор результатов взятых для рассмотрения экспериментов на критических сборках и реакторах (макроэкспериментов), а  $I_p$  – есть результаты расчетов этих экспериментов с использованием исходных констант  $C$  ( $I_p$  – есть функция констант  $C$ ). По определению это всё есть случайные величины и для них можно принять нормальный закон распределения с известными средним значением и дисперсией.

Тогда можно поставить математическую задачу о нахождении нового набора констант  $C'$ , такого чтобы расчетные результаты, полученные с этими новыми константами,  $I'$ , «наилучшим образом» в смысле, например, обобщенного метода наименьших квадратов (*Generalized Linier List Square Method*) или метода максимального правдоподобия (*Maximum Likelihood Method*) описывали всю совокупность выбранных экспериментов. При этом, исходя из нормального закона распределения случайных величин  $C$  и  $C'$ , различия между наборами новых констант  $C'$  и исходных  $C$  не должны противоречить величинам погрешностей, заложенным в их ковариационной матрице погрешностей  $W$ . Совместная вероятность таких событий, исходя из нормального закона распределения случайных величин  $I_3$ ,  $I_p$ ,  $C$  и  $C'$ , есть по определению функция правдоподобия  $L$ :

$$L = \exp\left\{-\frac{1}{2} \times [ (C' - C)^T W^{-1} (C' - C) + (I' - I_3)^T U^{-1} (I' - I_3) \right\}, \quad (1)$$

и задача сводится к нахождению её максимального значения. В этом состоит суть метода максимального правдоподобия. Таким образом, очевидно, задача сводится к минимизации квадратичной формы  $S^2$ , стоящей в показателе экспоненты функции правдоподобия  $L$  в (1).

Метод максимального правдоподобия позволяет найти такие поправки  $p_n$ , образующие вектор  $\mathbf{P}$ , к константам  $\sigma_n$ , которые обеспечивают наилучшее расчетное описание некоторой рассматриваемой совокупности экспериментов (погрешности которых описываются ковариационной матрицей  $\mathbf{U}$ ), не противоречащее исходным константам (погрешности которых описываются матрицей  $\mathbf{W}$ ). Т.е., если определить поправки  $p_n$  так, что полученные новые константы  $\sigma_n'$  определяются как:

$$\sigma_n' = \sigma_n (1 + p_n) \quad (2)$$

Исходя из нормального закона распределения случайных величин  $\sigma_n$  и  $\sigma_n'$ , и, считая, что различия между наборами новых констант  $\sigma_n'$  и исходных  $\sigma_n$  не должны противоречить величинам погрешностей, заложенным в исходной ковариационной матрице  $\mathbf{W}$ , строится функция правдоподобия (1) и задача сводится к минимизации квадратичной формы в показателе экспоненты, которая на примере  $K_{эфф}$  может быть записана в виде:

$$S^2 = \mathbf{P}^t \mathbf{W}^{-1} \mathbf{P} + (\Delta \mathbf{k} + \mathbf{H} \mathbf{P})^t \mathbf{U}^{-1} (\Delta \mathbf{k} + \mathbf{H} \mathbf{P}). \quad (3)$$

Дифференцируя величину  $S^2$  по элементам вектора  $\mathbf{P}$  и приравнявая все эти частные производные нулю, получим систему линейных уравнений:

$$(\mathbf{W}^{-1} + \mathbf{H}^t \mathbf{U}^{-1} \mathbf{H}) \mathbf{P} = -\mathbf{H}^t \mathbf{U}^{-1} \Delta \mathbf{k}, \quad (4)$$

откуда вектор  $\mathbf{P}$  можно выразить следующим образом:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{W}^{-1} + \mathbf{H}^t \mathbf{U}^{-1} \mathbf{H})^{-1} (-\mathbf{H}^t \mathbf{U}^{-1} \Delta \mathbf{k}). \quad (5)$$

Известно, что матрица, обратная матрице коэффициентов системы уравнений (4), есть ковариационная матрица  $\mathbf{W}'$  откорректированных констант:

$$\mathbf{W}' = (\mathbf{W}^{-1} + \mathbf{H}^t \mathbf{U}^{-1} \mathbf{H})^{-1} = \mathbf{W} - \mathbf{W} \mathbf{H}^t (\mathbf{U} + \mathbf{H} \mathbf{W} \mathbf{H}^t)^{-1} \mathbf{H} \mathbf{W} \quad (6)$$

С помощью матрицы  $\mathbf{W}'$  можно найти ожидаемые погрешности расчетов с использованием новых откорректированных констант. Для дисперсии  $\mathbf{D}'$  интересующей нас расчетной величины, если  $\mathbf{z}$  есть вектор чувствительностей этой величины к константам, получим выражение:

$$\mathbf{D}' = \mathbf{z} \mathbf{W}' \mathbf{z}^t = \mathbf{z} \mathbf{W} \mathbf{z}^t - \mathbf{z} \mathbf{W} \mathbf{H}^t (\mathbf{U} + \mathbf{H} \mathbf{W} \mathbf{H}^t)^{-1} \mathbf{H} \mathbf{W} \mathbf{z}^t, \quad (7)$$

Для набора  $I$  интегральных величин (например, серии расчетных значений  $K_{эфф}$ ) новая ковариационная матрица  $V'$  ожидаемых расчетных погрешностей по откорректированным константам, если  $Z$  есть матрица чувствительностей этих величин к константам, есть:

$$V' = Z W' Z^t = Z W Z^t - Z W H^T (U + H W H^T)^{-1} H W Z^t \quad (8)$$

С найденным вектором поправок  $P$  связан новый вектор расчетно-экспериментальных расхождений для набора  $I$  значений  $K_{эфф}$ , на основе которых проведена корректировка констант,  $\Delta k' = \Delta k + H P$  (соответственно, для набора интересующих нас расчетных результатов  $\Delta K' = \Delta K + Z P$ ).

Можно показать, что минимальное значение квадратичной формы (3)  $S_{\min}^2$ , соответствующее вектору  $P$ , может быть вычислено по формуле:

$$S_{\min}^2 = \Delta k^t (U + H W H^t)^{-1} \Delta k. \quad (9)$$

Формула (5) в качестве одного из результатов даёт величины смещений констант – поправки  $p_n$  (вектор  $P$ ), которые необходимо применить для получения новых констант  $\sigma_n'$ , с использованием которых будет получено «удовлетворительное» согласие между расчетными и экспериментальными результатами (в смысле критерия  $\chi^2$ ). Величина  $S_{\min}^2$  является функцией случайных величин (элементы вектора  $\Delta k$  так же являются случайными величинами) и можно определить новую величину:

$$\chi^2 = S_{\min}^2 / I, \quad (10)$$

которая в математической статистике используется в качестве критерия согласия между ожидаемым разбросом расчетно-экспериментальных расхождений и фактически наблюдаемыми расхождениями. Оказывается, что в случае, когда использованные в выше описанной процедуре экспериментальные результаты не противоречат друг другу (с учетом приписанных им величин погрешностей и корреляций), величина  $\chi^2$  в (10) распределена по  $\chi^2$ -распределению с  $I$  степенями свободы, которое, если число рассматриваемых экспериментов  $I$  достаточно велико, близко к

нормальному со средним значением, равным единице и дисперсией  $2/I$ . Таким образом, если мы наблюдаем значительное отличие значения  $\chi^2$  от 1, т.е. существенно более чем на  $\pm\sqrt{2/I}$ , то это можно рассматривать как свидетельство о наличии серьезных противоречий в рассматриваемой совокупности расчетных и экспериментальных данных. В этом случае точность расчетных величин  $k'_{c,i}$  нужно характеризовать не ожидаемыми погрешностями  $\delta_{expect} = \sqrt{V'_{i,i}}$ , а более консервативной оценкой – «наблюдаемыми погрешностями»  $\delta_{observ} = \sqrt{\chi^2 \cdot V'_{i,i}}$ , где  $V'_{i,i}$  – диагональные элементы матрицы  $V'$  из (8). В частности, при слишком большом отличии величины  $\chi^2$  от единицы, необходимо провести поиск сомнительных оценок, их переоценку и переоценку погрешностей, или может быть даже исключить из анализа.

Изложенная методика оценки погрешностей расчетных предсказаний есть так называемая «методика корректировки констант с учетом интегральных экспериментов», которая в случае отсутствия противоречий в рассматриваемой совокупности расчетных и экспериментальных данных даёт величины смещений констант, определяемые по формуле (5).

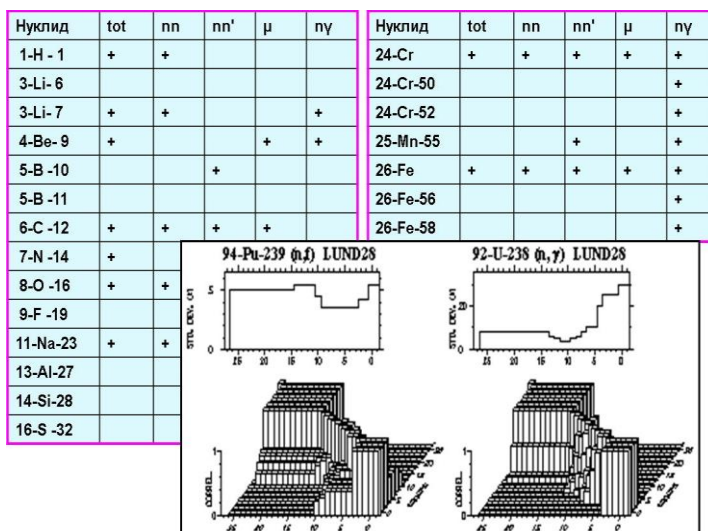


Рисунок 3 – Примеры ковариационных матриц погрешностей из библиотеки LUND

приведены примеры содержания библиотеки LUND и графического

В разделе 2.5 дано описание библиотеки LUND ковариационных матриц погрешностей констант, в которой хранится информация о величинах погрешностей и их корреляционных свойствах в 28-ми групповом виде для всех важных сечений реакций и нуклидов. На рисунке 3

представления матриц погрешностей с помощью имеющейся сервисной программы MATRLOT в системе ИНДЭКС.

**В разделе 2.6** дано описание библиотеки интегральных экспериментов LEMEX. В ней содержатся результаты измерений, выполненных на различных физических стендах (БФС и за рубежом). Кроме экспериментальных результатов LEMEX содержит также результаты расчетов измеренных величин вместе со всеми введенными поправками и их погрешностями. На сегодня это более 400 экспериментальных результатов и соответствующих им расчетных величин: Кэфф, отношения сечений и центральных коэффициентов реактивности (ЦКР). В таблице 1 дан список серий экспериментов из библиотеки LEMEX.

Таблица 1 – Список экспериментов из библиотеки LEMEX

BFS-31	BFS-49-2	BFS-62-1	KBR-10	GODIVA	SCHERZO	ZEBRA-3
BFS-33	BFS-49-3	BFS-62-2	KBR-11	FLAT-23	BIG-TEN	SNEAK-7A
BFS-35	BFS-49-4	BFS-62-3	KBR-12	FLAT-25	ZEBRA-2	SNEAK-7B
BFS-38	BFS-51	BFS-61	KBR-13	FLAT-PU	ZPR-3-11	ZPR-3-48
BFS-39	BFS-54	BFS-64	KBR-15	JEZEBEL	ZPR-3-12	ZPR-3-49
BFS-41	BFS-55	BFS-85	KBR-18	JEZEB-PU	ZPR-3-6F	ZPR-3-56B
BFS-42	BFS-56	BFS-87	KBR-19	JEZEB-23	ZPR-3-32	ZPR-9-31
BFS-44	BFS-57	BFS-73	KBR-20	THOR	ZPR-3-33	ZPPR-2
BFS-45-A	BFS-58	KBR-7	KBR-21		ZPR-6-6A	ZPR-6-7
BFS-49-1	BFS-59	KBR-9	KBR-22		VERA-1A	ZPR-3-53
					VERA-1B	ZPR-3-54

**В разделе 2.7** дано описание комплекса программ CORE, для анализа и оценки расчетной погрешности, связанной с неточностью используемых в расчетах ядерно-физических констант, а также для корректировки этих констант на основе результатов оцененных

("benchmark") экспериментов. В комплексе CORE реализованы описанные алгоритмы корректировки, анализа непротиворечивости данных и оценки точности с использованием программ и методов матричной алгебры. Для выполнения операций матричной алгебры программы комплекса CORE используют специальную библиотеку процедур, осуществляющих сложение прямоугольных матриц (SUMD); умножение прямоугольных матриц (MHZT, MWN); транспонирование матрицы (OPA); умножение прямоугольной матрицы на транспонированную (MHZ); преобразование квадратной симметрической матрицы в нижнюю треугольную матрицу (TRLANG);

обращение квадратной симметрической матрицы (REVERD) и др.

В ГЛАВЕ 3 представлены результаты апробации системы CONSYST/БНАБ и системы ИНДЭКС в практических расчетах. Для выявления и оценки систематических погрешностей, обусловленных применением многогруппового приближения, необходимо было сравнить результаты многогрупповых расчётов (с использованием системы CONSYST/БНАБ) с результатами прецизионных расчётов с использованием детальных файлов нейтронных данных. Для оценки погрешностей, обусловленных неопределенностью нейтронных констант, необходимо было провести сравнение с расчетами по другим программам, провести сравнение с имеющимися экспериментальными данными, и провести анализ погрешностей за счет неопределенностей в константах с использованием методик системы ИНДЭКС.

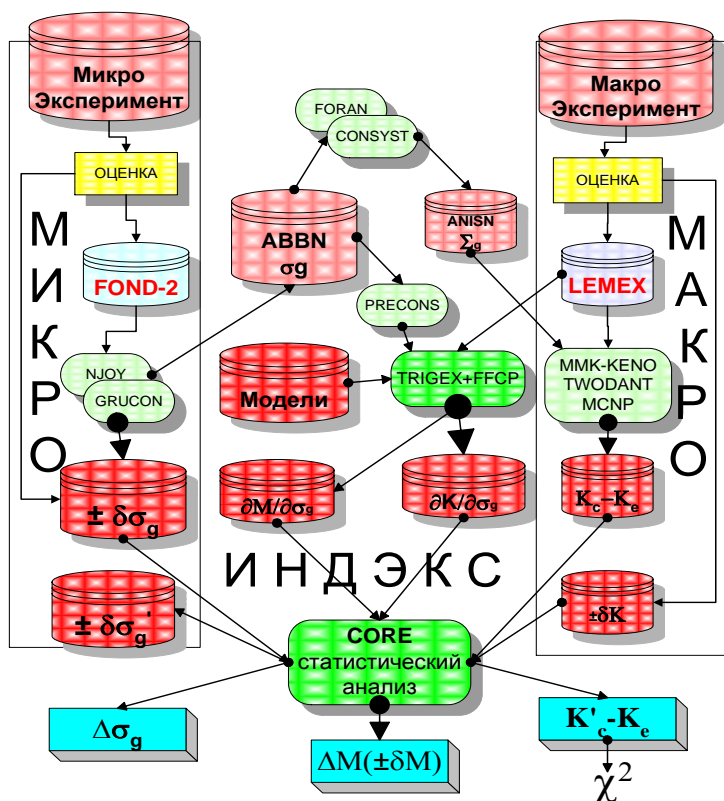


Рисунок 4 – Схема валидации используемых библиотек констант и расчетных программ

В разделе 3.1 рассмотрены методические особенности задачи валидации нейтронных констант в расчетах бэнчмарк экспериментов. Схема валидации используемых в расчетах быстрых реакторов библиотек нейтронных констант и расчетных программ дана на рисунке 4. Можно выделить три основные стадии расчетно - аналитических работ: (1) стадия «Микро»,

(2) стадия «Макро» и (3) стадия статистического анализа наблюдаемых расчетно-экспериментальных расхождений с использованием программного комплекса CORE системы ИНДЭКС. Расчетные работы на стадии «Микро»

включают в себя анализ и оценку имеющихся дифференциальных измерений энергетических зависимостей сечений, которые для каждого типа сечения (полное, радиационный захват, деление и т.д.) выполнены различными авторами в разные годы с использованием различных методик. Их цель выработка наилучшего (в известном смысле) описания энергетического поведения каждого из парциальных сечений, сравнение с имеющимися данными (в файлах ENDF/B, JEFF и др.) и включение полученных результатов оценки в файлы оцененных данных РОСФОНД. На этой стадии, наряду с оцененными сечениями, будут составлены ковариационные матрицы погрешностей этих сечений и результаты включены в библиотеку LUND и в соответствующую секцию файлов оцененных данных. Расчеты на этой стадии осуществляются с использованием программ теории ядра, по оптическим моделям и др.

Расчетные работы на стадии «Макро» включают в себя анализ и оценку имеющихся многочисленных интегральных и макроскопических экспериментов, выполненных на стандартных спектрах, критических сборках, физических стендах (БФС) и реакторных установках. На этой стадии будут выполнены оценки и разработаны модели бэнчмарк экспериментов. Расчеты по оценке экспериментов осуществляются с использованием программ расчета реакторов TRIGEX, MMK, MCNP.

К настоящему моменту созданы и используются при верификации нейтронно-физических кодов и констант электронные банки экспериментальной информации, доведенной до уровня "бэнчмарк", это – банк реакторно-физических экспериментов IRPhEP Handbook и банк экспериментов по критической безопасности ICSBER Handbook.

**В разделе 3.2** представлены результаты тестирования системы CONSYST/БНАБ в расчетах критических бэнчмарк-экспериментов и, в частности, из справочника по критической безопасности ICSBER Handbook.

На рисунках 5 – 8 даны результаты сравнения расчетов критичности систем по зарубежным библиотекам данных и РОСФОНД для топливных и

конструкционных материалов и со свинцом с использованием системы константного обеспечения CONSYST/БНАБ. Как следует из этих данных, отклонения в расчетах критичности бенчмарк-моделей по константам БНАБ-РФ от экспериментальных величин составляют  $\sim 0.5\%$ . Расчеты по БНАБ-РФ и РОСФОНД согласуются в пределах  $\pm 0.2\%$ . Аналогичное сравнение для сборки ZPR-3/56, содержащей большое количество натрия, показывает, что разброс расчетов по разным библиотекам составляет  $\sim \pm 0.8\%$ . Расчеты по файлам РОСФОНД согласуются с экспериментом в пределах  $\pm 0.2\%$ .

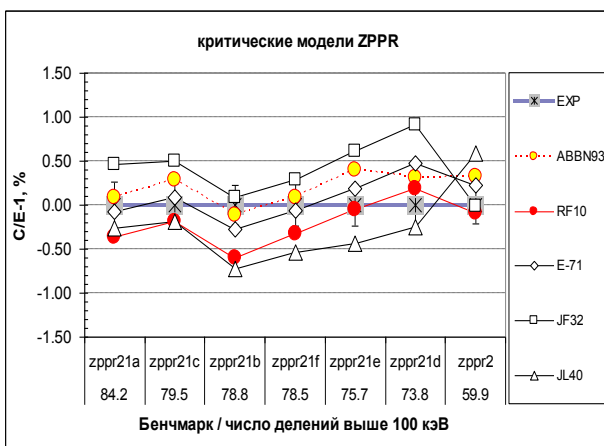


Рисунок 5 – Сравнение результатов расчетов критичности экспериментов на стенде ZPPR

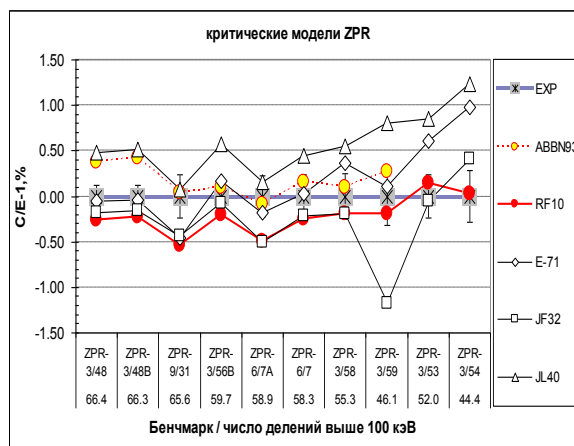


Рисунок 6 – Сравнение результатов расчетов критичности экспериментов ZPR

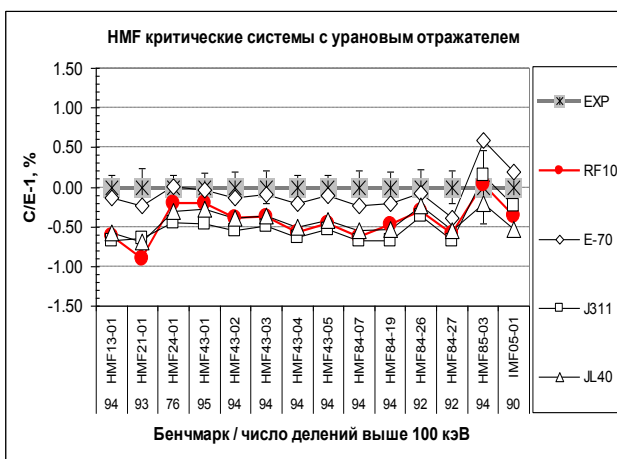


Рисунок 7 – Сравнения результатов расчетов критичности экспериментов для валидации конструкционных материалов

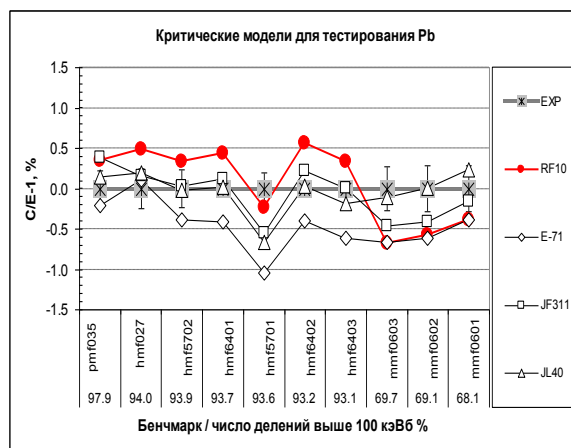


Рисунок 8 – Сравнение результатов расчетов критичности экспериментов для валидации сечений свинца

В таблице 2 для ряда гомогенных и гетерогенных систем приведены сводные результаты величин расхождений расчетных и экспериментальных значений  $K_{эфф}$  (средние смещения и среднеквадратичные отклонения),

полученные с использованием системы CONSYST и библиотек констант БНАБ-93 и БНАБ-РФ. Результаты подтверждают ранее выполненную оценку погрешности расчетов ядерной безопасности  $\pm 0.6\%$  за счет методической и константной погрешностей (для 67% доверительного интервала  $1\sigma$ ).

Таблица 2 – Сводные результаты расчетного анализа экспериментов ICSBER с использованием системы CONSYST/БНАБ

Вариант расчета	Число экспериментов	Средне-квадратичное отклонение, %	Среднее смещение, %
Эксперименты для валидации топливных материалов			
MCNP (БНАБ-РФ)	53	0.58	-0.12
ММКК (БНАБ-93)	51	0.68	0.11
MCNP (ENDF/B-VII.1)	53	0.71	0.09
MCNP (JENDL-4.0)	53	0.79	0.18
Эксперименты для валидации конструкционных материалов			
MCNP (БНАБ-РФ)	29	0.43	-0.36
MCNP (ENDF/B-VII)	29	0.39	0.08
MCNP (JEFF-3.1)	29	0.58	-0.17
Эксперименты для валидации материалов теплоносителя			
MCNP (БНАБ-РФ)	11	0.55	0.04
MCNP (ENDF/B-VII)	11	0.50	-0.41
MCNP (JENDL-4.0)	11	0.24	0.02

**В разделе 3.3** представлены результаты тестирования системы CONSYST/БНАБ в расчетах переноса излучения.

Выполненное тестирование включенных в константную систему CONSYST/БНАБ данных по образованию в результате реакции  $(n,\gamma)$  и взаимодействию гамма-квантов с веществом проводилось путем сравнения расчетных и экспериментальных результатов для двух бенчмарк-моделей ALARM-CF-FE-SHIELD-001 и ALARM-CF-PB-SHIELD-001 из справочника ICSBER Handbook. Это наборы железных и свинцовых сфер различного радиуса с помещенным в центр сфер калифорниевым источником известной мощности.

Оценка экспериментов и разработка бенчмарк-моделей ALARM-CF-FE-SHIELD-001 и ALARM-CF-PB-SHIELD-001 выполнена Г.Н.Мантуровым

в соавторстве с Е.Рожихиным и Л.Трыковым.

**В разделе 3.4** представлены результаты верификации программных средств (ПС) и ядерно-физических баз данных в расчетах быстрых реакторов.

На рисунке 9 приведены копии титульных листов полученных аттестационных паспортов на программные средства для расчетов реакторов БН-600 и БН-800. Константное обеспечение CONSYST/БНАБ с константами БНАБ-93 сегодня внедрено в расчеты быстрых реакторов БН, БРЕСТ, МБИР и СВБР, и используется в инженерных и прецизионных программах: TRIGEX, ГЕФЕСТ, JAR-FR, FACT-BR, REACTOR, CARE, ММКК и MCNP для поисковых и проектных расчетов.



Рисунок 9 – Аттестационные паспорта ПС для расчетов БН-600 и БН-800 с использованием системы CONSYST и констант БНАБ-93 библиотек файлов данных.

**В разделах 3.5 и 3.6** даны оценки погрешности расчетов активных зон реакторов БН-600 и БН-800. Результаты взяты из верификационных отчетов для проектных кодов с использованием системы CONSYST с константами БНАБ-93. Расчеты выполнены методом Монте-Карло по программам ММКК, ММКС и MCNP с использованием различных

В таблице 3 представлены результаты оценки константной составляющей погрешности в расчетах активной зоны реактора БН-800 с учетом интегральных (макро) экспериментов, выполненных на критических сборках БФС, а также зарубежных ZPR и ZPPR.

Как видно, погрешность расчетного предсказания  $K_{эфф}$  с учетом макро экспериментов снизилась с  $\pm 2.2\%$  до  $\pm 0.6\%$  и близка к требуемой точности, в отличие от предыдущих оценок (эти данные легли в основу оценок погрешностей расчетов БН-800 для программ ГЕФЕСТ, TRIGEX и JAR-FR).

Таблица 3 – Оценки погрешности расчетов стартового состояния БН-800

Источник данных	k-eff	КВ	Q <sub>аз</sub>	СУЗ	НПЭР	Доплер эффект
Точность, обеспечиваемая микроданными	2.2%	0.05	10%	10%	0.6% Δk/k	12%
Точность, обеспечиваемая БНАБ-78	1.4%	0.04	8%	8%	0.5% Δk/k	12%
Точность, обеспечиваемая БНАБ-93	0.6%	0.03	4%	6%	0.2% Δk/k	11%

В таблице 4 приведены обеспечиваемые кодами TRIGEX и JAR-FR погрешности в расчетах НФХ активных зон реакторов БН-600 и БН-800.

Таблица 4 – Погрешности, обеспечиваемые TRIGEX и JAR-FR, для БН-800 в сравнении с БН-600 (данные взяты из аттестационного паспорта ПС)

НФХ	БН-600	БН-800
$K_{эфф}$	0,2%	0,6%
НПЭР	0,3%	0,22%
Эффективность СУЗ	7% - КС 8% - АЗ	6% - КС 6% - АЗ
Распределение энерговыделений	5,5% - а.з. 10% - БЗВ	3% - а.з. 5% - БЗВ
Доплер-эффект	10%	11%

Отметим, что погрешность в расчетах  $K_{эфф}$ , обеспечиваемая кодом сопровождения ГЕФЕСТ-800, в отличие от TRIGEX и JAR-FR, оценена равной ±0,4%. Снижение погрешности с ±0.6% до ±0.4% достигнуто за счет учета экспериментов, выполненных при физическом пуске реактора БН-800. Также отметим, что погрешность в расчетах  $K_{эфф}$  реактора БН-600, равная ±0.2%, достигнута за счет учета экспериментов, выполненных на реакторе БН-600 за время его эксплуатации.

Таблица 5 – Результаты расчетов  $K_{эфф}$  модели стартовой зоны БН-800

	БНАБ-93	БНАБ-РФ	РОСФОНД
Гомогенная модель			
ММК	0.9906	0.9912	0.9902
Гетерогенная модель			
ММК	0.9982 (+0.76%)	0.9991 (+0.79%)	0.9988 (+0.86%)

В таблице 5 приведены результаты расчетов  $K_{эфф}$  для стартовой активной зоны БН-800 по программе ММКК с константами БНАБ и программе ММКС с файлами РОСФОНД. Как видно, оцененная методическая поправка к 299-ти групповому расчету (отличие расчетов с БНАБ-РФ от РОСФОНД) составляет  $\sim 0.1\%$  (отличие расчетов гетерогенных и гомогенных моделей составляет  $+0.8\%$ ).

В разделах 3.7 и 3.8 представлены результаты расчетов моделей реакторов МБИР и БН-1200. Для РУ МБИР результаты групповых и детальных расчетов согласуются между собой в пределах  $\pm 0.2\%$ , а отличие расчета по ММКС с детальными сечениями из РОСФОНД от группового расчета по ММКК с константами БНАБ-РФ составляет менее  $0.2\%$ . Результаты расчетов модели БН-1200 с нитридной зоной находятся в хорошем согласии. Максимальные расхождения расчетов с БНАБ-РФ и БНАБ-93 не превышают  $0.5\%$ . Отличие расчета по ММКС с детальными сечениями из РОСФОНД от группового расчета по ММКК с константами БНАБ-РФ составляет менее  $0.1\%$ .

В разделе 3.9 приведены результаты расчетов экспериментов на критических сборках и физических стендах БФС, ZPR и ZPPR.

В таблице 6 приведены результаты для сборок ZPPR с большим содержанием плутония. Как видно, расчеты по ММК описывают эксперименты в пределах экспериментальной погрешности  $\pm 0.2\%$ . Результаты расчетов с использованием констант БНАБ-93, БНАБ-РФ и

файлов РОСФОНД хорошо согласуются между собой, а различия в них не превышают  $\pm 0.1\%$ .

Таблица 6 – Расчеты Кэфф сборок ZPPR (отношение C/E)

Сборка	ММКК / БНАБ-93	ММКК / БНАБ-РФ	ММКС / РОСФОНД
ZPPR-9	0.9985	0.9994	0.9982
ZPPR-10A	0.9982	0.9992	0.9989
ZPPR-18B	0.9986	0.9999	-
ZPPR-19B	0.9985	0.9995	-

В таблице 7 приводятся результаты расчетов критического эксперимента на БФС с вставкой с нитридным топливом с использованием различных библиотек нейтронных данных. Результаты расчетов по ММК имеют статистическую погрешность  $\pm 0.02\%$ , что на порядок меньше погрешности экспериментальных состояний  $\pm 0.3\%$ .

Таблица 7 – Результаты расчетов сборки БФС с нитридным топливом

Программа расчета	Нейтронные данные	Модификация сборки БФС	Расчетное значение $k_{eff}$
ММКК	БНАБ-93	1	1.0050 (2)
ММКК	БНАБ-РФ		1.0022 (2)
ММКС	РОСФОНД		0.9992 (2)
ММКС	JEFF-3.2		0.9986 (2)
ММКС	JENDL-4.0		1.0044 (2)
ММКС	ENDF\B-VII.1		0.9978 (2)
ММКК	БНАБ-93	2	1.0041 (2)
ММКК	БНАБ-РФ		1.0022 (2)
ММКС	РОСФОНД		1.0012 (2)
ММКС	ENDF\B-VII.1		0.9990 (2)

Как мы видим, программа ММКС с файлами РОСФОНД (как и с ENDF/B-VII) описывает эксперименты с точностью до их погрешности, в

которую главный вклад вносит технологическая погрешность, связанная с неточностью знания составов используемых материалов, размеров и окружения. Расхождения в расчетах по ММКК и ММКС не превышают  $\pm 0.3\%$ , а согласие расчетов с БНАБ-РФ с детальными расчетами по файлам РОСФОНД составляет  $\pm 0.2\%$ .

В таблице 8 приведен список использованных для анализа бенчмарк-экспериментов со свинцовым теплоносителем. В таблице 9 и на рисунке 10 приводятся результаты расчетов отобранных экспериментов с использованием различных нейтронных данных в виде отклонений расчета от эксперимента (C/E-1) в процентах.

Таблица 8 – Список отобранных бенчмарк-экспериментов для анализа

Бенчмарк-модель	Краткое описание
ROMB (серия из 6 сборок)	Эксперименты ВНИИТФ
HMF-027 и PMF-035	Бэнчмарк-эксперименты ICSBER
BFS-61, -77 и др.	Эксперименты, выполненные на БФС

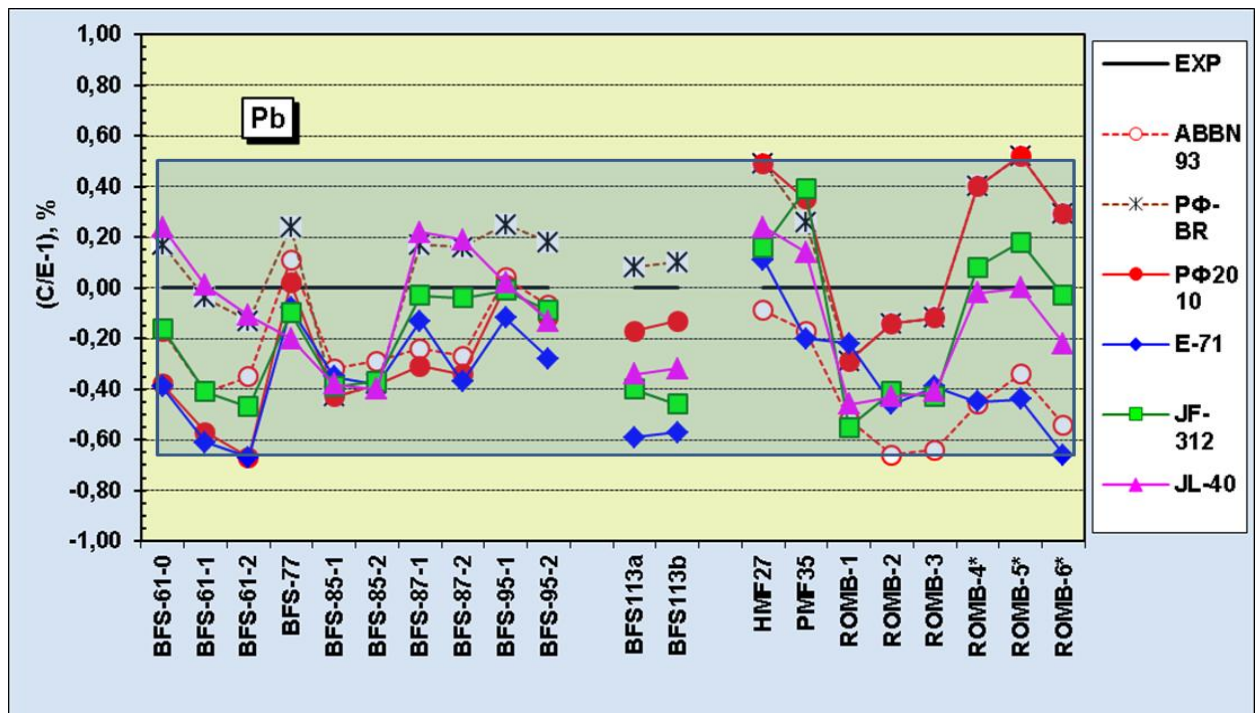


Рисунок 10 – Результаты расчетов экспериментов со свинцом с использованием различных нейтронных данных

Из этих данных видно, что современные данные, в том числе, БНАБ-РФ и БНАБ-93, описывают эксперименты далеко не идеально, с примерно равной точностью  $\pm 0,25\%$ . Максимальный разброс данных составляет от  $-0,7\%$  до  $+0,5\%$ .

Таблица 9 – Результаты расчетов критических сборок БФС со свинцом

Величина	БНАБ-93	БНАБ-РФ	ENDF/B-7	JEFF-3.1	JENDL-4
Среднее значение, %	-0,27	-0,10	0,18	-0,29	-0,01
Среднеквадратичное расхождение, %	$\pm 0,21$	$\pm 0,25$	$\pm 0,21$	$\pm 0,23$	$\pm 0,27$

**В разделе 3.10** рассмотрено приложение методики к оценке погрешностей в расчетах моделей активных зон перспективных быстрых реакторов – натриевого типа БН-1200 и реактора со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-300 с использованием методики системы ИНДЭКС: ковариационных матриц погрешностей констант БНАБ-93 из библиотеки LUND; результатов экспериментов из библиотеки LEMEX; коэффициентов чувствительности из библиотеки LSENS. Оценки точности основаны на отобранных для анализа интегральных и реакторных бэнчмарк экспериментах, список которых приведен в таблице 10.

Таблица 10 – Отобранные для оценки точности эксперименты

Эксперимент	Результаты измерений
Интегральные эксперименты на стандартных спектрах	
Спектр деления $\chi_{U235}, \chi_{Cf252}$	F235, F238, F239
Спектр деления $\chi_{U235}$	Сечения увода U-238 и Fe
Бэнчмарк («чистые») интегральные эксперименты	
GODIVA	$K_{эфф}$ , F39/F35, F38/F35
JEZEBEL	$K_{эфф}$ , F39/F35, F38/F35
Бэнчмарк эксперименты на стендах БФС	
БФС-38, -41, -58, -62, -72	$K_{эфф}$
БФС-44, -49	$K_{эфф}$ , F39/F35, F38/F35, C38/F35
Бэнчмарк эксперименты на стендах ZPR	
ZPR-6-7, ZPPR-2, 9, 10	$K_{эфф}$ , F39/F35, F38/F35, C38/F35

В таблице 11 приведены принятые во внимание в процедуре корректировки нейтронные константы, неопределенности которых вносят наибольший вклад в погрешность расчета  $K_{эфф}$ .

Таблица 11 – Принятые во внимание нейтронные константы

Нуклиды	$\sigma_{tr}$	$\sigma_c$	$\sigma_f$	$\sigma_{el}$	$\sigma_{in}$	$\nu$
Pu-239		+	+			+
Pu-240		+	+			
Pu-241			+			+
U-238		+	+		+	+
N	+	+		+		
Na	+			+	+	
Pb	+	+		+	+	
Fe	+	+		+	+	
B-10		+				
FP-239		+			+	

Оценки выполнены на примере следующих важных нейтронно-физических характеристик активной зоны быстрого реактора:  $K_{эфф}$ , эффекты реактивности (НПЭР, СУЗ), энерговыделение ( $Q_{аз}$ ), число смещений на атом (СНА), параметры запаздывающих нейтронов ( $\beta_{эфф}$ ), коэффициент воспроизводства (КВ).

В таблице 12 показано, как учет различных наборов макро экспериментов влияет на снижение расчетной погрешности. Для этого рассмотрено несколько вариантов оценки погрешностей с последовательным подключением наборов различных экспериментов в процедуру корректировки:

- Вариант 1 – средние сечения и сборки GODIVA и JEZEBEL;
- Вариант 2 – плюс измерения на критсборках БФС;
- Вариант 3 – плюс зарубежные сборки ZPR, ZPPR;
- Вариант 4 – плюс гипотетическая полномасштабная сборка БФС с большим содержанием нитридного топлива.

Для каждого из вариантов выполнена формальная процедура корректировки констант (5), получены откорректированные матрицы

погрешностей констант с учетом результатов экспериментов по вышеописанной методике по формуле (6) и на их основе оценены погрешности расчетных результатов по формуле (8).

Таблица 12 – Результаты оценки точности расчетов для реактора типа БН

НФХ	Только микро-данные	Погрешности с учетом экспериментов			
		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
$K_{эфф}$	1,9%	1,1%	0,8%	0,7%	0,5%
АЗ	5,3%	5,3%	4,3%	4,1%	4,0%
КС	5,5%	5,5%	4,5%	4,3%	4,1%
НПЭР	0,5% $\Delta k/k$	0,5% $\Delta k/k$	0,4% $\Delta k/k$	0,4% $\Delta k/k$	0,3% $\Delta k/k$
Доплер	11%	11%	10%	10%	10%
$Q_{аз}$	5.0%	5.0%	3.5%	3.0%	2.8%
СНА	5.0%	5.0%	3.0%	3.0%	3.0%
$\beta_{эфф}$	5.0%	5.0%	4.0%	4.0%	4.0%
КВ	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03

Как видно из этих данных, учет макро экспериментов позволяет существенно снизить расчетные погрешности НФХ. Так, например, погрешность в  $K_{эфф}$  (наиболее важной величины), обусловленная неопределенностями в константах, снижается с  $\pm 1.9\%$  до  $\pm 0.7\%$  за счет учета имеющихся макроэкспериментов, а с привлечением дополнительно гипотетического полномасштабного эксперимента на сборке БФС погрешность за счет констант в  $K_{эфф}$  может быть снижена до уровня технологической погрешности  $\pm 0.5\%$ .

В таблице 13 приводятся результаты оценки константной погрешности в расчетах модели быстрого реактора со свинцовым теплоносителем типа БРЕСТ-300.

Как видно, погрешность расчетного предсказания  $K_{эфф}$  с учетом выполненных экспериментов снизилась с  $\pm 2.0\%$  до  $\pm 0.8\%$ . За счет учета эксперимента на БФС с большим содержанием нитрида урана эта погрешность может быть уменьшена до величины  $\pm 0.6\%$ .

Таблица 13 – Оцененные погрешности в расчетах реактора БРЕСТ

НФХ	Константная погрешность	
	Уровень «микро- данных»	С учетом всех экспериментов
$K_{эфф}$	2,0%	0,8% (0,6% *)
АЗ	5,0%	3,3%
КР	5,0%	3,4%
ПЭР	0,6% $\Delta k/k$	0,4% $\Delta k/k$
Q(а.з.)	5%	3%

\* - с учетом гипотетического эксперимента на БФС с нитридным топливом

Одним из основных преимуществ методик, заложенных в системе ИНДЭКС, является то, что, наряду с оценкой ковариационной матрицы откорректированных по результатам интегральных экспериментов констант и вычисленных на её основе погрешностей результатов расчетов интересующих нас реакторно-физических характеристик, заложенные в ней методики дают возможность получить величины отдельных вкладов в погрешность расчета за счет отдельных типов сечений и нуклидов. Рассмотрение величин вкладов и определение наиболее значимых дает возможность поставить задачу о повышении точности расчетов путем планирования проведения дополнительных экспериментов, направленных на уточнение тех или иных ядерно-физических констант.

В таблице 14 для обоих типов быстрых реакторов даны оцененные отдельные вклады в погрешность расчета величины  $K_{эфф}$  от нейтронных данных без учета (уровень «микроданных») и с учетом интегральных экспериментов. В таблице указаны основные источники погрешностей, они выделены жирным шрифтом.

Для перспективного натриевого реактора и реактора со свинцовым теплоносителем основной вклад в суммарную погрешность расчета дают следующие неопределенности в сечениях нуклидов:  $^{238}\text{U}$  -  $\sigma_c$ ,  $\sigma_{in}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  -  $\sigma_f$ ,  $\nu$ , сечение захвата продуктов деления -  $\sigma_c$ , транспортное сечение для конструкционных материалов и теплоносителя и спектр деления.

Таблица 14 – Вклады в погрешность расчета  $K_{эфф}$  (без учета и с учетом интегральных экспериментов) за счет неопределенностей в сечениях входящих в состав зон нуклидов

Нейтронные данные		Вклад в суммарную погрешность без учета интегральных экспериментов, %		Вклад в суммарную погрешность с учетом интегральных экспериментов, %	
		БН	БРЕСТ	БН	БРЕСТ
U-238	$\sigma_c$	0.8	0.9	0.5	0.6
	$\sigma_f$	0.3	0.3	0.2	0.2
	$\nu$	0.1	0.1	0.1	0.1
	$\sigma_{in}$	0.7	0.7	0.3	0.3
PU-239	$\sigma_c$	0.3	0.3	0.2	0.2
	$\sigma_f$	1.1	1.1	0.5	0.6
	$\nu$	0.4	0.4	0.4	0.4
PU-240	$\sigma_c$	0.2	0.2	0.2	0.2
	$\sigma_f$	0.1	0.1	0.1	0.1
PU-241	$\sigma_c$	0.4	0.2	0.2	0.2
	$\sigma_f$	0.1	0.1	0.1	0.1
N	$\sigma_{el}$	0.1	0.2	0.1	0.2
	$\sigma_c$	0.2	0.5	0.2	0.5
Na (БН) Pb (БРЕСТ)	$\sigma_{tr}$	0.2	0.7	0.2	0.6
	$\sigma_c$	0.1	0.2	0.1	0.2
	$\sigma_{el}$	0.2	0.1	0.2	0.1
	$\sigma_{in}$	0.2	0.4	0.2	0.3
Fe	$\sigma_{tr}$	0.3	0.2	0.2	0.2
	$\sigma_c$	0.1	0.2	0.1	0.1
	$\sigma_{in}$	0.4	0.4	0.2	0.2
FP-239	$\sigma_c$	0.4	0.4	0.4	0.4
Спектр деления	$\chi$	0.2	0.2	0.2	0.2
Суммарная погрешность		1.9	2.0	$\pm 0.72$ ( $\pm 1.1$ )	$\pm 0.80$ ( $\pm 1.4$ )

Методика корректировки констант применялась для оценки погрешностей расчетного предсказания важнейших характеристик быстрых

реакторов. Результаты этой работы проявились в согласии эксплуатационных характеристик реакторов БН-350, БОР-60, БН-600, БН-800 с проектными значениями в пределах указанных в проектной документации погрешностей.

Практические примеры использования системы константного обеспечения CONSYST/БНАБ и системы ИНДЭКС показывают, что эти разработки соответствуют самому современному мировому уровню и по объему содержащихся данных не имеют аналогов за рубежом. Таким образом, созданное программно-методическое обеспечение на базе вычислительной системы ИНДЭКС может служить проверенной базой для оценки точности расчетного предсказания характеристик объектов ЯЭУ новых поколений на основе анализа накопленного за многие десятилетия опыта расчетно-экспериментальных исследований.

**В ГЛАВЕ 4** рассмотрены пути дальнейшего развития и совершенствования константного обеспечения расчетов быстрых реакторов. Рассмотрены требования, которые должны предъявляться к константному обеспечению нового поколения. Наряду с традиционными работами по созданию баз фундаментальной информации о физических свойствах материалов, баз данных ядерно-физических многогрупповых констант для практического использования, созданию программных средств, обеспечивающих внедрение полученной ядерно-физической информации в практические расчеты, должен быть обеспечен целый комплекс работ по проверке надёжности расчётных предсказаний на основе этих данных, включая развитие и совершенствование методов и программ оценки погрешностей расчетных предсказаний, расширение и создание новых баз данных оцененных (бэнчмарк) экспериментов, разработка новых библиотек ковариационных матриц погрешностей входных параметров, расширение списка рассчитываемых функционалов и расчет для них чувствительностей и т.д. Подчеркивается, что, хотя в настоящее время полнота и точность оцененных нейтронных данных неизмеримо возросли, тем не менее, погрешности расчётных предсказаний, обусловленные неточностью знания

нейтронных данных, остаются неприемлемо большими (около 1% в  $K_{эфф}$  быстрых реакторов). Учёт интегральных экспериментов позволяет снизить эту погрешность в 3-5 раз и довести её до приемлемой величины (0,3%, т.е. порядка или меньше  $\beta_{эфф}$ ). Поэтому постановка задачи развития, совершенствования и создания нового поколения системы кодов и константного обеспечения для расчетного обоснования ЯЭУ является, и ещё многие годы будет являться весьма актуальной.

**В Заключение** представлены основные выводы и результаты диссертационной работы.

В процессе исследований был выполнен большой объем расчетно-аналитических работ, в результате чего разработана система константного обеспечения CONSYST/БНАБ для использования в нейтронно-физических расчетах быстрых реакторов и радиационной защиты, включая расчеты параметров ядерной безопасности и топливного цикла. Создан вычислительный программный комплекс CONSYST, обеспечивающий использование и внедрение библиотек многогрупповых ядерно-физических констант БНАБ-93 и БНАБ-РФ в практические расчеты.

Созданное константное обеспечение CONSYST/БНАБ адаптировано к современным расчетным методикам и покрывает основные потребности в ядерных данных, требующихся при расчетах характеристик безопасности всех ядерных и радиационно-опасных объектов атомной энергетики.

Надежность созданного константного обеспечения подтверждена многочисленными результатами верификационных расчетов, выполненных на основе сравнения результатов прецизионных расчетов с данными представительного набора экспериментов. Показано, что в случае использования констант БНАБ-РФ методическая погрешность многогруппового приближения составляет менее  $\pm 0,3\%$ , а во многих практических случаях не превышает  $\pm 0,1\%$ .

Второй целью работы являлось создание программно-методического обеспечения для оценки точности расчетного предсказания характеристик

объектов ЯЭУ на основе анализа накопленного за многие десятилетия опыта расчетно-экспериментальных исследований. Разработаны методики и алгоритмы учета этой информации в виде вычислительного комплекса CORE, библиотек результатов экспериментов и расчетов LEMEX, ковариационных матриц погрешностей 28-ми групповых констант LUND, объединенных в вычислительную систему ИНДЭКС. Развитая методика успешно применена для оценки погрешностей расчетного предсказания важных нейтронно-физических характеристик действующих и проектируемых инновационных моделей быстрых реакторов. Показано, что основной вклад в полную погрешность расчета вносят неопределенности в используемых ядерно-физических константах и существенное снижение погрешности расчетов может быть достигнуто за счет привлечения результатов уже выполненных или планируемых реакторно-физических экспериментов на критических сборках, физических стендах и действующих реакторах.

Разработанные методики и алгоритмы обладают научной новизной и не имеют отечественных и зарубежных аналогов. Все они реализованы в виде расчетных программ и прошли апробацию в решении практических задач.

Практические примеры использования системы CONSYST/БНАБ и системы ИНДЭКС показывают, что эти разработки соответствуют самому современному мировому уровню и не имеют аналогов за рубежом. По результатам работы получено 14 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных ядерно-физических констант.

В результате исследований, выполненных в рамках данной диссертационной работы, решена научная проблема, имеющая важное научное и народно-хозяйственное значение. Разработана, научно обоснована и реализована на практике, и внедрена в проектные расчеты система константного обеспечения CONSYST/БНАБ, представляющая собой замкнутую методическую базу на основе комплекса вычислительных программ CONSYST и банков данных БНАБ-93 и БНАБ-РФ, что дает

возможность проведения высокоэффективных и высокоточных расчетов моделей и проектов быстрых реакторов, радиационной защиты, параметров ядерной и радиационной безопасности, и топливного цикла.

Единая методическая основа при проведении нейтронно-физических расчетов обеспечивает прозрачность процедуры получения расчетных результатов, надежность их верификации, и получение гарантированной точности расчетных результатов.

Предложенные научно обоснованные методики по оценке и повышению точности расчетных предсказаний физических характеристик быстрых реакторов, параметров ядерной безопасности и топливного цикла, способствуют повышению эффективности, надежности и безопасности действующих и проектируемых, и новых перспективных реакторных установок, и объектов атомной энергетики.

Внедрение полученных научных результатов и предложенных методик способствует повышению конкурентоспособности и независимости Российских технологий на мировом рынке.

Таким образом, цели работы достигнуты.

В разработке и апробации представленных в диссертации программных средств и баз данных приняли участие большой коллектив авторов, чей труд и знания позволили успешно выполнить поставленные задачи.

Особую искреннюю благодарность я хотел бы выразить доктору физ.-мат. наук, профессору М.Н.Николаеву, который является одним из основоположников системы БНАБ и оказывал постоянную помощь и внимание к работе; сотрудникам А.М.Цибуле, М.Ю.Семенову, В.Н.Кощеву, Г.М.Жердеву, Е.В.Рожихину, С.М.Беднякову, принимавшим участие в постановке задач и анализе экспериментов, А.А.Перегудову, Г.Б.Ломакову, Ю.Е.Головко и О.Н.Андриановой, Л.В.Горбачевой и Е.Е.Багдасаровой за помощь в расчетах и помощь в подготовке и оформлении публикаций.

## **Основные публикации по теме диссертации**

### Публикации в изданиях (в том числе, рекомендуемых ВАК России)

1. 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. Сер. Ядерные константы, Вып.1, 1996, с. 59-98.
2. Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsiboulia A.M. BNAB-93 Group Data Library. Part 1: Nuclear Data for Calculation of Neutron and Photon Radiation Fields. INDC (CCP)-409/L, IAEA, p.65-110 (1997).
3. Zabrodskaja S., Ivanova T., Koshcheev V., Manturov G., Nikolaev M., Rozhikhin Y., Khomiakov Y., Tsiboulia A., Tsiboulia A. Nuclear data set ABBN-93.2 and its usage for nuclear criticality and radiation safety estimations// Journal of Nuclear Science and Technology, 2002.
4. Nikolaev M., Tsiboulia A., Manturov G. Some Aspects of Preparation and Testing of Group Constants System ABBN-90. INDC(NDS)-317, p.159, IAEA, Vienna (1994).
5. Бедняков С.М., Мантуров Г.Н., Дитце К. Уточнение сечений захвата изотопов молибдена на основе анализа экспериментов на быстрых сборках. // Атомная энергия, 1990, т. 69. С. 31-36.
6. Бедняков С.М., Мантуров Г.Н. Тестирование и уточнение сечений захвата продуктов деления в экспериментах по возмущению реактивности. // Атомная энергия, 1992, т. 72. С. 95-99.
7. Мантуров Г.Н. Применение метода максимального правдоподобия к оценке нейтронных данных. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Обнинск. 1984.
8. Мантуров Г.Н. Программное обеспечение задач анализа чувствительностей реакторных характеристик к ядерным константам: Препринт ФЭИ-1034, Обнинск, 1980.
9. Алексеев П.Н., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н. Оценка погрешностей расчета коэффициентов критичности и воспроизводства энергетических

быстрых реакторов из-за неточности нейтронных данных. // Атомная энергия. 1980, т.49, вып.4, с.221-224.

10.Мантуров Г.Н., Матвеев В.И. Николаев М.Н., Троянов М.Ф., Цибуля А.М. Требования к точности расчета нейтронно-физических характеристик быстрых реакторов-размножителей и пути их удовлетворения. // Атомная Энергия, 1989, №67(3), С. 181-186.

11.Бемер Б., Мантуров Г.Н. Ковариации в нейтронных спектрах и их влияние на результаты корректировки нейтронного потока на корпус реактора // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. 1998. Вып. 1, С.28-34.

12.Кощев В.Н., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н. и др. Библиотека групповых констант БНАБ-РФ для расчетов реакторов и защиты // Известия ВУЗов. Ядерная Энергетика. 2014. №3. С.93-101.

13.Перегудов А.А., Кощев В.Н., Мантуров Г.Н. Методика получения нейтронных групповых констант для материалов - смесей изотопов в системе БНАБ. // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. 2011. №2. С. 43-50.

14.Koshcheev V. N., Manturov G. N., Nikolaev M. N., Tsibouliya A. M. Verification of Neutron Data for Main Reactor Materials from RUSFOND Library based on Integral Experiments. EPJ Web of Conferences, Vol.42, 07006, 7 pages (2013) <https://doi.org/10.1051/epjconf/20134207006>.

15.Koshcheev V. N., Manturov G. N., Semenov M. Yu., Tsibouliya A. M. Testing of Neutron Data for Fe, Cr, Ni based on Integral Experiments. EPJ Web of Conferences, Vol.42, 07005, 6 pages (2013). <https://doi.org/10.1051/epjconf/20134207005>.

16.Перегудов А.А., Кощев В.Н., Мантуров Г.Н. Методика получения нейтронных групповых констант для материалов - смесей изотопов в системе БНАБ. // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. 2011. № 2. С. 43-50.

17.Андрианова О.Н., Головки Ю.Е., Жердев Г.М., Задорнов Д.В., Кощев В.Н., Мантуров Г.Н., Перегудов А.А., Цибуля А.М. Тестирование ковариационных матриц погрешностей системы констант БНАБ // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. 2014. №2. С.109-117.

18. Головки Ю.Е., Кошечев В.Н., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н., Рожихин Е.В., Семенов М.Ю., Цибуля А.М., Якунин А.А. Верификация современной версии констант БНАБ и программы подготовки CONSYST в расчетах критичности // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. 2014. №2. С.99-108.
19. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Программа подготовки констант CONSYST. Описание применения: Препринт ФЭИ-2828. Обнинск, 2000.
20. Поляков А., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Аннотация программы CONSYST // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. Вып. 1-2, М., 2007.
21. Иванова Т.Т., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Рожихин Е.В., Семенов М.Ю., Цибуля А.М. Валидация системы константного обеспечения ABBN/CONSYST. Часть 1: Валидация по результатам критических экспериментов с компактными металлическими активными зонами // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. 2007. Вып. 2, М., С.58-67.
22. Иванова Т.Т., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Рожихин Е.В., Семенов М.Ю., Цибуля А.М. Валидация системы константного обеспечения ABBN/CONSYST. Часть 1: Валидация по результатам критических экспериментов с активными зонами, содержащими растворы урана // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. 2007. Вып. 2, М., С.68-74.
23. Дедуль А.В., Кошечев В.Н., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н. Новые возможности программы CONSYST – форматы gndlmac и gndlmic для обеспечения константами программ PMSNSYS и KINXYZ // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы. 2014. №3. С.49-61.
24. 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  $P_n$ -приближении: Препринт ФЭИ-2887, 2001.
25. Мантуров Г.Н. Система программ и архивов ИНДЭКС // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1984, вып. 5(59), с. 20.

26. Андрианова О.Н., Перегудов А.А., Мантуров Г.Н. и др. Использование метода GRS для оценки погрешности нейтронно-физических характеристик перспективного быстрого реактора // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. 2014. Обнинск. №2. С.90-98.
27. Горбачева Л.В., Мантуров Г.Н., Цибуля А.М. Оценка результатов измерений средних сечений деления U-238 и Pu-239 на спектрах нейтронов деления U-235 и Cf-252 // Атомная энергия, 1980, т.49, вып.4, с.256-260.
28. Головки Ю.Е., Кощев В.Н., Мантуров Г.Н., Цибуля А.М. Применение метода наименьших квадратов для оценки константной погрешности расчетов критичности систем с плутонием // Ядерная физика и инжиниринг. Безопасность ядерных реакторов, Москва, 2014, том 5, №4, с.293-303.
29. Manturov G., Rozhikhin Y., Trykov L. ALARM-CF-FE-SHIELD-001: Neutron and Photon Leakage Spectra from Cf-252 Source at Centras of Three Lead Spheres of Different Diameters, NEA/NSC/DOC/(95)03/VIII, Vol. VIII, 2013, 77 pages.
30. Manturov G., Rozhikhin Y., Trykov L. ALARM-CF-PB-SHIELD-001: Neutron and Photon Leakage Spectra from Cf-252 Source at Centras of Six Iron Spheres of Different Diameters, NEA/NSC/DOC/(95)03/VIII, Vol. VIII, 2013, 156 pages.
31. Грабежной В.А., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н. Использование системы групповых констант БНАБ для расчетного анализа экспериментов по радиационной защите. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы. 2017. Вып. 1, С.106-114
32. Асатрян Д.С., Белов А.А., Белоусов В.И., Березнев В.П., Ивченко Д.В., Селезнев Е.Ф., Чернова И.С., Кощев В.Н., Мантуров Г.Н., Перегудов А.А., и др. Комплекс программ ГЕФЕСТ800 для проведения эксплуатационных расчетов нейтронно-физических характеристик БН-800 в стационарном режиме. // Атомная энергия, 2015. Том 118, выпуск №6, С.303-309.
33. Асатрян Д.С., Белов А.А., Белоусов В.И., Березнев В.П., Ивченко Д.В., Селезнев Е.Ф., Чернова И.С., Картишов К.В., Мантуров Г.Н. и др. Комплекс программ ГЕФЕСТ800 для проведения эксплуатационных расчетов

нейтронно-физических характеристик БН-800 в нестационарном режиме. // Атомная энергия, 2015. Том 119, выпуск №6, С.3-8.

34. Manturov G. Effects of Nuclear Data Library on BFS and ZPPR Keff Analysis Results. // Nuclear Science and Engineering, Vol. 114, pp.211-218 (2003).

35. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н. Первоочередные задачи развития систем константного обеспечения расчетов реакторов и защиты // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. 2016. №2. С.133-142.

36. Мантуров Г.Н. Система кодов и констант для расчетов быстрых реакторов и оценки погрешностей // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы. 2017. Вып.1. С.115-128.

37. Пляскин В.И., Косилов Р.А., Мантуров Г.Н. СПРАВОЧНО-ИНФОРМАЦИОННАЯ ИНТЕРАКТИВНАЯ СИСТЕМА "ТРАНСМУТАЦИЯ НУКЛИДОВ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ" // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, 2003. №1-2. С.103-109.

#### Коллективные монографии

1. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н. Ковариационная матрица погрешностей групповых констант БНАБ-МИКРО / В кн. Групповые константы для расчета реакторов и защиты. М.: Энергоиздат, 1981. С.220-229.

2. Болятко В.В., Вырский М.Ю., Илюшкин А.И., Мантуров Г.Н., Машкович В.П., Николаев М.Н и др. Погрешности расчётов защиты от излучений / Под ред. В.П.Машковича. М., Энергоиздат, 1983, 176с.

3. Bolyatko V.V, Vyorskii M.Yu., Ilyushkin A.I., Manturov G.N., Mashkovich V.P., Nikolaev M.N., et al. / Error Estimation in Reactor Shielding Calculations. American Institute of Physics, N.Y., 1987.

#### Свидетельства о государственной регистрации программ и баз данных

1. 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.

2. Свидетельство № 2016620461 от 12.04.2016 о гос. регистрации базы данных БНАБ-РФ / Кощеев В.Н., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля

А.М.

3. Свидетельство № 2014620091 от 15.01.2014 о гос. регистрации базы данных БНАБ-93 / Кощев В.Н., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Семенов М.Ю., Цибуля А.М.

4. Свидетельство № 2016620471 от 14.04.2016 о гос. регистрации базы данных ИНДЭКС / Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М.

5. Свидетельство № 2013612298 от 21.02.2013 о гос. регистрации программы для ЭВМ CONSYST / Кощев В.Н., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Семенов М.Ю., Цибуля А.М.

6. Свидетельство № 2016612789 от 10.03.2016 о гос. регистрации программы для ЭВМ CORE / Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М.

7. Свидетельство № 2016612266 от 20.02.2016 о гос. регистрации программы для ЭВМ FORAMPX / Жердев Г.М., Мантуров Г.Н.

8. Свидетельство № 2016612864 от 11.03.2016 о гос. регистрации программы для ЭВМ FORAN / Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М.

9. Свидетельство № 2016612265 от 20.02.2016 о гос. регистрации программы для ЭВМ FORMCNP / Блыскавка А.А., Мантуров Г.Н., Цибуля А.М.

10. Свидетельство № 2014612579 от 28.02.2014 о гос. регистрации программы для ЭВМ ММКС / Блыскавка А.А., Жемчугов Е.В., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Раскач К.Ф., Семенов М.Ю., Цибуля А.М.

11. Свидетельство № 2014610575 от 15.01.2014 о гос. регистрации программы для ЭВМ ММККЕНО / Блыскавка А.А., Коробейников В.В., Кощев В.Н., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Полевой В.Б., Раскач К.Ф., Рожихин Е.В., Семенов М.Ю., Цибуля А.М.

12. Свидетельство № 2016612435 от 26.02.2016 о гос. регистрации программы для ЭВМ SUBGRAN / Жердев Г.М., Мантуров Г.Н., Цибуля А.М.

13. Свидетельство № 2013660588 от 11.11.2013 о гос. регистрации программы для ЭВМ TRIGEX / Кислицына Т.С., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Пивоваров В.А., Семенов М.Ю., Серегин А.С., Цибуля А.М.

14. Свидетельство № 2016612436 от 26.02.2016 о гос. регистрации программы

для ЭВМ TRIUM / Андрианова О.Н., Жемчугов Е.В., Мантуров Г.Н., Перегудов А.А., Раскач К.Ф., Семенов М.Ю., Цибуля А.М.

Материалы конференций

1. Nikolaev M.N., Savoskin M.M., Tsyboulia A.M., Krivtsov A.S., Sinitsa V.V., Manturov G.N. Modern State of the SOCRATOR System. // Proc. Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, May 30 - June 3 1988, Mito, Japan, pp.619-621.
2. Tsiboulia A., Nikolaev M., Koscheev V., Dulin V., Manturov G., Semenov M. Critical Experiments Analysis by ABBN-90 Constant System. // Proc. of the Nuclear Criticality Technology Safety Project, Williamsburg, Virginia, May 10-11 1994. LA-13277-C, LANL (1997).
3. Blokhin A.I., Ignatyuk A.V. Kosheev V.N., Kuzminov B.D., Manokhin V.N., Manturov G.N., Nikolaev M.N. Library of Evaluated Neutron Data Files. // Proc. of Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, May 30 - June 3 1988, Mito, Japan, pp.611-613.
4. Blochin A., Fursov B., Ignatyuk V., Manturov G. Current Status of Russian Evaluated Neutron Data Libraries. // Proc. of Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology May, 9-13 1994, Gatlinburg, Tennessee. Vol. 2, pp.695-698 (1994), ORNL, ANS.
5. Manturov G., Nikolaev M., Semenov M., Tsiboulia A. Testing of BROND-2, JENDL-3 and ENDF/B-VI Neutron Data Through Integral Experiments Using ABBN-90 Constant System. // Proc. of Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology May, 9-13 1994, Gatlinburg, Tennessee. Vol. 2, pp.803-806 (1994), ORNL, ANS.
6. Manturov G.N., Influence of Neutron Data Uncertainties on Accuracy of Prediction of Advanced Reactor Characteristics. // Proc. of Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, May 9-13 1994, Gatlinburg, Tennessee. Vol. 2, pp.993-999 (1994), ORNL, ANS.
7. Андрианова О.Н., Кощев В.Н., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н., Якунин А.А. Результаты верификации комплекса CONSYST с константами на базе

файлов РОСФОНД2010. // Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики «Нейтроника-2012», 2012, т.1. С.295.

8. Grabeznoy V., Koscheev V., Lomakov G., Manturov G. Verification of the ABBN-RF2010 constants in calculations of shielding benchmarks. // Proc. of Intern. Conf. on Radiation Shielding 'ICRS-12 & RPSD-2012'. Nara, Japan, September 2-7, 2012.

9. Andrianova O., Koscheev V., Lomakov G., Manturov G. Neutron data adjustment based on integral critical experiments on the BFS-facility with different neutron spectrum. // Proc. of Intern. Conf. PHYSOR 2016 – Nuclear Data, Evaluations & Libraries. Sun Valley Resort, Sun Valley, Idaho, USA, May 1 - 5, 2016, on CD-ROM (2016).

10. Peregudov A., Andrianova O., Manturov G., et al. Application of the GRS method for estimation of uncertainties of LMFBR type reactor physics parameters with taking into account macroscopic experiments. // Proc. of Intern. Conf. PHYSOR 2014 – The Role of Reactor Physics Toward a Sustainable Future. The Westin Miyako, Kyoto, Japan, September 28 – October 3, 2014, (on CD-ROM)

11. Ivanova T.T., Manturov G.N., Nikolaev M.N., Raskach K.F., Rozhikhin E.V., Tsiboulia A.M. Estimation of Accuracy of Criticality Prediction of Highly Enriched Uranium Homogeneous Systems on the Basis of Analysis of Data from ICSBEP Handbook. // Proc. of Intern. Conf. on Nuclear Criticality Safety (ICNC 2003). Tokai-Mura, Japan, October 20-24, 2003, pp. 283-288.

12. Кощеев В.Н., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Семенов М.Ю., Цибуля А.М. Константное обеспечение расчетов CONSYST/БНАБ в комплексе программ ГЕФЕСТ-800 // Материалы отраслевого семинара “Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики” – «Нейтроника-2014», Обнинск, 21-23 октября, 2014.

13. Salvatore M, Palmiotti G., Aliberti G., Archier P., De Saint Jean C., Dupont E., Herman M., Ishikawa M., Ivanova T., Ivanov E., Kim S.-J., Kodeli I., Manturov G., et al. Methods and issues for the combined use of integral experiments and covariance data: Results of a NEA International Collaborative Study. Proc. of

Intern. Conf. ND-2013 – Nuclear Data for Science and Technology (published in Nuclear Data Sheets, 2014).

14.Plompen A.J.M., Fukahori T., Henriksson H., Ignatyuk A., Iwasaki T., Manturov G., et al. The NEA High Priority Nuclear Data Request List for future needs // Proc. of Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology (ND2007), April 22-27, 2007, Nice, France, EDP Sciences, 2008, p.202.