

СТАТЬИ

УДК 621.039.51

ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ФУНДАМЕНТ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Николаев М.Н. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск)

Ядерно-физический фундамент является краеугольным камнем (или сектором) общего научно-технического фундамента ядерной энергетики. Другие секторы этого фундамента — теплогидравлический, материаловедческий, химико-технологический, геобиоценологический, политэкономический — тесно связаны как один с другим, так и с ядерно-физическим сектором.

Ядерно-физический фундамент имеет сложную структуру. В его основе лежит совокупность рекомендованных для практического использования ядерных данных: характеристик взаимодействия излучения с молекулами, атомами и атомными ядрами. Эта совокупность содержит огромный объем структурно сложной цифровой информации. Основанием для рекомендаций данных этой совокупности для практического приложения служат результаты тщательного анализа измерений рассматриваемых характеристик с привлечением теоретических моделей, описывающих взаимодействие излучения с веществом. Далее будем называть эту совокупность библиотекой файлов оцененных ядерных данных (ФОНД).

Вторым слоем ядерно-энергетического фундамента является совокупность программ расчета ядерно-энергетических характеристик реакторов, радиационной защиты, хранилищ радиоактивных отходов, установок внешнего топливного цикла и др. Важным подслоем этого слоя является совокупность ядерно-физических констант, которые представляют собой ядерные данные, взятые из библиотеки ФОНД, но преобразованные в формы, требующиеся для использования в вычислительных программах. Как правило, современные вычислительные методы требуют многоэтапной адаптации этих констант к особенностям постановки каждой конкретной задачи. Адаптационные программы также входят в константный подслой.

Ядерно-энергетические характеристики рассчитываются, в основном, для решения трех типов задач:

сопровождение действующих реакторов, предприятий ЯТЦ, хранилищ радиоактивных отходов;

проектирование новых объектов ядерной энергетики;

тестирование расчетов путем сравнения с данными интегральных экспериментов, в которых измеряются рассчитываемые ядерно-физические характеристики как на специальных установках (критических стендах, защитных композициях и др.), так и действующих реакторах.

Последняя задача является одной из значительных разделов ядерно-энергетического фундамента, поскольку направлена на получение реалистичных оценок погрешностей расчетных предсказаний и снижение этих погрешностей на основе эксплуатационного опыта. В свою очередь, снижение расчетных погрешностей влечет за собой сокращение затрат на необоснованные избыточные меры и уменьшение риска аварий, связанных с недостаточностью этих мер.

До начала 1960-х гг. ядерно-энергетический фундамент ядерной энергетики был довольно шаток. В конструкциях первых ядерных реакторов предусматривался большой запас средств регулирования для компенсации неизбежных просчетов. По мере накопления опыта эксплуатации и объема экспериментальной информации о нейтронно-ядерных взаимодействиях стали формироваться обоснованные наборы ядерных данных, позволяющие все более точно прогнозировать характеристики сначала тепловых, затем и быстрых реакторов, которые требуют знания ядерных данных в более широком интервале энергии. Первой системой констант, позволяющей надежно рассчитывать быстрые реакто-

ры, явилась созданная в 1960 г. в ФЭИ система БНАБ-64, учитывающая опыт пуска и эксплуатации БР-1, -2, -5. Она успешно использовалась в проектах БОР-60 и БН-350. Система БНАБ-78 использовалась в проектах БН-600, -800, а также при расчетах радиационной защиты оборонных объектов по программам ИПМ РАН. Следующая версия — система БНАБ-93, использовавшаяся при подготовке БН-800 к пуску, состоявшемуся в 2016 г., в проектах быстрых реакторов SEFR, МБИР, БРЕСТ, БН-1200, СВБР, по существу, и явилась ядерно-физическим фундаментом современной ядерной энергетики. В ее основе лежала библиотека нейтронных данных ФОНД-2, созданная в 1990-х гг. Данные о взаимодействии γ -квантов с веществом и характеристики распада радионуклидов были взяты из множества отечественных и зарубежных справочников. В отличие от прежних версий констант БНАБ в системе БНАБ-93 число энергетических групп 299 было велико для адекватного описания энергетических зависимостей нейтронных сечений в быстрых реакторах. Для расчета тепловых реакторов константы БНАБ использовались только в области их применимости, в области разрешенных резонансов в прецизионной программе MSU (НИЦ «Курчатовский институт»), использовавшейся для верификации инженерных расчетов тепловых реакторов, применялись энергетические зависимости сечений, на основе которых были получены групповые константы, и влияние теплового движения атомных ядер учитывалось не только на энергетическую зависимость сечений (доплер-эффект), но и на индикатрисы рассеяния (эффект термализации).

С помощью разработанной в ФЭИ программы CONSYST 299-групповые константы перерабатывались в формы, необходимые для использования в программах расчета нейтронных полей как методом Монте-Карло, так и детерминистическими методами. Была предусмотрена возможность получения малогрупповых констант для расчета быстрых реакторов в диффузионном малогрупповом приближении, получившая широкое распространение в практических расчетах. Погрешности, неизбежные при использовании этого грубого приближения, корректировались путем введения поправок в конечные результаты на основе тестовых расче-

тов, выполнявшихся и приближенным, и прецизионным методами. Включенные в библиотеку БНАБ-93 данные об образовании γ -квантов в нейтронных реакциях, взаимодействии γ -излучения со средой, образовании радионуклидов в нейтронных реакциях и характеристиках их распада позволяли рассчитывать эффекты, связанные с изменением нуклидного состава топлива в кампании, с оценкой радиационных условий при обращении с отработавшим ядерным топливом и др. Верификация системы констант БНАБ-93 была выполнена в ФЭИ на основе анализа большого числа как отечественных, так и зарубежных критических экспериментов и экспериментов на макетах радиационной защиты.

Уже к 2005 г. стало ясно, что система констант БНАБ-93, несмотря на успешный опыт эксплуатации, нуждается в серьезном пересмотре: обновлении и пополнении базы ядерных данных, большем соответствии резко возросшим вычислительным возможностям, устранении выявившихся при практическом использовании недостатков и неполноты. В 2005 г. Министерство образования и науки заключило с АО «ГНЦ РФ — ФЭИ» контракт на разработку российской национальной библиотеки файлов оцененных нейтронных данных РОСФОНД. В 2007 г. работа была завершена. В РОСФОНД были включены оцененные нейтронные данные для всех 679 стабильных и долгоживущих (со временем жизни более 1 сут) изотопов и 7 более короткоживущих изотопов с высоким сечением поглощения тепловых нейтронов. Библиотека была также пополнена данными о взаимодействии γ -квантов со всеми элементами. Файлы оцененных данных в РОСФОНД включались на основе обоснованных рекомендаций экспертов, анализировавших все доступные оценки. Иллюстрированное обоснование с указанием ответственных экспертов заняло более 2000 с. (см. www.ippe.ru/podr/abbn/libr/pdf). Данные библиотеки РОСФОНДа были переработаны в формат 299-групповых нейтронных и 127-групповых γ -констант БНАБ. При этом были выявлены серьезные недостатки в оцененных данных, которые были устранены частично путем корректировки файлов (РОСФОНД-2010), частично — на уровне групповых констант (часть недостатков требовала кардинальной модификации файлов, на что не было ни времени, ни

сил). Новая система констант БНАБ-РФ была подключена к вычислительным программам, и началась ее верификация.

В 2013 г. по контракту с АО «НиИ» в ФЭИ было подготовлено подробное техническое задание на дальнейшее сопровождение библиотеки РОСФОНД, обеспечение ее соответствия растущему уровню знаний и потребностям отрасли. В качестве первоочередных задач были названы следующие:

- пересмотр оценок нейтронных данных для конструкционных материалов, так как принятые в РОСФОНДе оценки во многом противоречили интегральным экспериментам;

- пополнение библиотеки РОСФОНД данными о погрешностях нейтронных данных и корреляций между этими погрешностями (ковариационными файлами, необходимыми для оценки константной составляющей погрешностей расчетных результатов);

- пополнение библиотеки РОСФОНД данными о характеристиках распада радионуклидов, образующихся в нейтронных реакциях;

- возобновление деятельности отраслевой комиссии по ядерным данным, эффективно работавшей в советское время в течение нескольких десятилетий.

Техническое задание на сопровождение библиотеки РОСФОНД было принято заказчиком без замечаний, однако практической работы за этим не последовало. В результате недостатка финансирования и организационных неурядиц ФЭИ за истекшие годы потерял многих специалистов, участвовавших в создании РОСФОНДа и разработке технического задания на его сопровождение. Тем не менее в результате инициативной деятельности нескольких оставшихся специалистов, сохранивших между собой производственные связи, перечисленные первоочередные задачи оказались близки к разрешению:

- в настоящее время почти сформирована опытная версия файлов оцененных нейтронных данных для основных конструкционных материалов, учитывающая как новые, так и не учтенные ранее экспериментальные данные. Оценки показали, что эта версия по сравнению с исходной намного лучше согласуется с интегральными экспериментами на критических сборках;

- из широкого набора зарубежных оценок ковариационных матриц погрешностей нейтронных данных отобран наиболее правдоподобный, по мнению разработчиков, вариант. К сожалению, текстового обоснования этого отбора пока нет. Вызывает сомнение и полнота отобранного варианта. Так, в нем, видимо, нет данных о корреляциях погрешностей сечений разных нуклидов и сечений разных процессов одного и того же нуклида. Эти корреляции существенны, поскольку в большинстве случаев непосредственно измеряемыми являются отношения сечений (отношения сечений деления к сечению деления ^{235}U , отношение сечения захвата к сечению деления — величина α и др.);

библиотека характеристик распада образующихся в нейтронных реакциях радионуклидов, включенная в систему констант БНАБ-93, может служить базой для формирования недостающей части библиотеки РОСФОНД.

Из этого следует, что блок оцененных ядерных данных, необходимых для обновления ядерно-энергетического фундамента ядерной энергетики, близок к тому состоянию, когда в результате независимой экспертизы специалистами его можно будет принять в качестве стандарта для обновленной версии этого фундамента.

Следует отметить и существенное продвижение в переработке оцененных ядерных данных в форме, требующейся для использования в современных вычислительных средствах (ядерные константы). Важным этапом в этой переработке является получение многогрупповых констант, в той или иной степени приближенно описывающих известные сложные энергетические зависимости нейтронных сечений и энергетическое распределение рассеянных нейтронов и γ -квантов. В 1980-х гг. эта задача решалась с помощью разработанной в ФЭИ программы ГРУКОН. В 1990-х гг. специалистам ФЭИ стал доступен один из ранних зарубежных аналогов ГРУКОНа — американская программа NJOY. За истекшую четверть века произошло существенное развитие и ГРУКОНа, и его зарубежных аналогов, что в результате многочисленных взаимобменов привело к созданию новой версии NJOY-2016. Таким образом, стандартизованный инструмент преобразования РОСФОНДа в ядерные константы также имеется.

Существенным прогрессом за последние десятилетия явилась возможность детального описания энергетических зависимостей сечений и угловых распределений в расчетах методом Монте-Карло. В программе NJOY предусмотрен специальный формат ACE представления оцененных данных в форме, удобной для использования в подобных расчетах. Этот формат используется для описания распространения нейтронов, фотонов, электронов и других частиц в известной американской программе MCNP. Он используется и для нейтронных расчетов во многих отечественных программах, в частности, программе MCU. В 2014—2016 гг. в ФЭИ была разработана система РОКОКО для комбинированного константного обеспечения расчетов методом Монте-Карло, позволяющая детально описывать энергетические зависимости сечений только основных нуклидов, входящих в состав топлива, теплоносителя и конструкционных материалов, а сечения продуктов деления и второстепенных актиноидов описывать по упрощенной схеме — в 299-групповом приближении. Если надо, то с описанием резонансной структуры методом подгрупп. Подсоединение этой системы константного обеспечения к программе ММК для расчета быстрых реакторов методом Монте-Карло позволило время расчета основных нейтронно-физических характеристик выгоревшего топлива сократить в десятки раз. Эта экономия облегчает решение трудоемкой задачи пространственно-временного поведения реактора в переходных режимах.

Лежащая в основе системы РОКОКО библиотека КОЛИБРИ, содержащая как детальные энергетические зависимости нейтронных сечений и угловых распределений упруго рассеянных нейтронов, так и весь набор многогрупповых нейтронных и γ -констант, открывает возможность существенного усовершенствования многогрупповых методов решения уравнения переноса, по-прежнему широко используемых в расчетах радиационной защиты и многовариантных инженерных расчетах быстрых реакторов. В частности, внедрение нового варианта метода подгрупп позволит избавиться от приближения угловой независимости полного сечения, особенно необоснованного в расчетах радиационной защиты. Приближение узких резонансов, лежащее в основе широко используемого метода факторов самоэкранировки груп-

повых сечений, во многих случаях оказывается неоправданным, и в этих случаях наличие детальных энергетических зависимостей нейтронных сечений позволяет избавиться от этого приближения. Совместное использование метода Монте-Карло для расчета ячеек гетерогенных решеток ядерных реакторов и их моделей, собираемых на критических сборках, позволит вводить поправки на недиффузионность в мало-групповые константы, используемые в диффузионных расчетах, а не в результаты их расчетов. Таким образом, в константно-методическом разделе ядерно-энергетического фундамента ядерной энергетики также имеется еще немало нерешенных задач.

Еще одной важной частью ядерно-энергетического фундамента является верификация ядерных данных в интегральных экспериментах. Таковыми являются измерения интегральных ядерно-физических характеристик реакторов, радиационной защиты или специально сконструированных моделей этих установок. Сравнение результатов интегральных экспериментов с расчетами дает возможность получить реалистичную оценку погрешностей и, более того, в некоторых случаях позволяет существенно снизить эту погрешность. В 1990-х гг. был создан полный набор методик анализа интегральных экспериментов и их использования для повышения точности расчетных предсказаний физических характеристик реакторов. Значительная часть интегральных экспериментов в настоящее время собрана в международных справочниках International Criticality Safety Benchmark Experiments Handbook, International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, SINBAD (эксперименты на моделях радиационной защиты). Последний справочник далеко не полон. В него не вошла, в частности, обширная экспериментальная информация, полученная в ФЭИ в экспериментах по исследованию свойств материалов радиационной защиты на БР-10. Важный экспериментальный материал был накоплен при пуске и эксплуатации реакторов АЭС, в частности, быстрых БН-350, «Феникс», «Суперфеникс» (Франция), БН-600, -800. К сожалению, важные для корректной оценки результатов экспериментов детали условий их выполнения (режим перегрузок, глубина выгорания на каждом этапе эксплуатации) в открытых источниках отсутствуют. В настоящее время

интегральные эксперименты в обоснование физики быстрых реакторов проводятся только на критических стендах БФС в ФЭИ. Зарубежные аналоги этих стендов законсервированы.

В настоящее время накопленная в интегральных экспериментах информация использована для верификации ядерных данных далеко не полностью. В большинстве верификационных работ основное внимание обращалось на оценку точности расчета критичности, в результате чего проблемы оценки ядерной безопасности удалось разрешить в наиболее полной мере. Однако и здесь есть серьезные проблемы. Так, в большинстве верификационных работ, в которых анализировались эксперименты с критическими растворами делящихся материалов, рассматривались, главным образом, растворы, не содержащие добавок поглотителей (бора, гадолиния). Между тем системы с поглотителями наиболее информативны по отношению к области энергии, пограничной между областью разрешенных и неразрешенных резонансов, в которой погрешности нейтронных сечений значительны. В то же время именно эта область энергии ответственна за точность оценки критичности систем из влажных порошков делящихся веществ, формирующихся при химической переработке отработавшего ядерного топлива.

Международное увлечение проблемами критической безопасности заслонило другие немаловажные проблемы, в частности, ключевую для физики быстрых реакторов с натриевым теплоносителем оценку натриевого пустотного эффекта реактивности. Как большинство эффектов реактивности, он обусловлен конкуренцией между положительным и отрицательным вкладом плотности натрия в реактивность. Очевидно, что для снижения погрешности расчета натриевого пустотного коэффициента желательно располагать экспериментальными данными и о положительных, и об отрицательных составляющих этого эффекта. Подобные данные можно было бы получить путем измерения зависимости сечения деления ^{238}U и сечения поглощения нейтронов в натрии от плотности натрия. Информативными были бы и измерения реактивности плотности натрия в зависимости от его расположения в активной зоне.

Длительность топливной кампании быстрых реакторов высокая и приводит к значительному

выгоранию топлива и накоплению продуктов деления. Верификация расчета изменения коэффициента размножения за счет накопления продуктов деления представляла бы несомненный интерес. Хотя изготовление образца совокупности продуктов деления, накапливающихся в топливе, и обращение с этим образцом представляют трудноразрешимую проблему, целесообразно рассмотреть информативность эксперимента с муляжом такого образца, в котором радиоактивные продукты деления были бы заменены подобными им по свойствам поглощения нейтронов стабильными изотопами. Повидимому, можно было бы предложить немало и иных методик, повышающих информативность экспериментов на стендах БФС, а также на основе опыта, накапливаемого при эксплуатации энергетических быстрых реакторов.

В заключение нельзя обойти вопрос о том, зачем необходимо укрепление ядерно-энергетического фундамента ядерной энергетики в современных условиях. С одной стороны, уточнение ядерных данных для действующих энергоблоков с быстрыми реакторами является важной задачей с учетом неуклонного повышения выгорания топлива, перспектив его дальнейшего увеличения и необходимости улучшения расчетного прогноза нейтронно-физических характеристик. С другой, надежный ядерно-энергетический фундамент необходим для реализации новых проектов, тех, что входят, например, в проектное направление «Прорыв», тех, что потребуются для замыкания топливного цикла в двухкомпонентной ядерной энергетике и др. Степень обоснованности проектов различна, как и вероятность успешной реализации новых проектов, но перспективы завершения разработки проекта реакторной установки и энергоблока БН-1200 определены. Задачи повышения точности расчетного определения нейтронно-физических характеристик активной зоны БН-1200, снижения запаса реактивности, использования плутония различного происхождения и, следовательно, изотопного состава, достижения глубокого выгорания топлива и накопления продуктов деления, сжигания актиноидов, включая америций и нептуний, полученные при переработке отработавшего топлива ВВЭР, предъявляют новые требования. Нельзя допустить непрерывное накопление отработавшего топлива, при том, что есть единственное кардинальное

решение — рециклическое сжигание всех или почти всех актиноидов в ядерных реакторах и надежное захоронение долгоживущих радиоактивных продуктов деления. Именно такая схема использования природного урана имела в виду в начале развития ядерной энергетики, когда было предложено обеспечить расширенное воспроизводство ядерного топлива в быстрых реакторах. И именно она начала развиваться в 1960-х гг. в ФЭИ под руководством А.И. Лейпунского и во Франции. Во Франции развитие быстрых реакторов было приостановлено на некоторое время, однако сейчас известны намерения к возобновлению программы быстрых реакторов. Технологии переработки отработавшего топлива там были освоены, и в PWR стало использоваться смешанное уран-плутониевое оксидное топливо. В нашей стране попытки организовать переработку и повторное использование отработавшего топлива в 1990-х гг. были прерваны. Таким образом, технология избавления от радиоактивных отходов ядерной энергетики так и осталась неразработанной — эта задача передается грядущим поколениям. Чтобы эти грядущие поколения смогли с ней справиться, необходимо, в частности, передать им

тот ядерно-энергетический фундамент, без которого эти технологии не построишь.

Поскольку сопровождение ядерно-энергетического фундамента в нашей стране не организовано, необходимо зафиксировать современное его состояние: обновить и пополнить РОСФОНД и придать ему статус отраслевого стандарта, зафиксировать в официальных документах методики подготовки оцененных данных к расчетам, обоснования этих методик и методик верификации расчетных результатов. Было бы полезно при выработке этих документов создать на их основе учебные пособия, с помощью которых накопленный за три четверти века опыт практических работ в области ядерной физики мог бы быть передан студентам 2020—2030-х гг. Этот опыт им понадобится при реализации любых сценариев развития, которые связаны с замыканием ядерного топливного цикла в двухкомпонентной ядерной энергетике, состоящей из тепловых и быстрых реакторов, при разработке технологий сжигания актиноидов, анализе проектных и запроектных аварий.

Поступила в Редакцию 20.04.17

УДК 621.039.58

РИСКИНФОРМИРОВАННЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ВВЭР

*Козлачков А.Н., Сирияпин В.Н., Сирияпин Н.В., Трибелев А.А., Шеин В.П.
(АО ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, Московская обл.)*

Применительно к техническим системам под риском подразумевается сочетание вероятности события и его последствий [1, 2]. Это может быть представлено в виде кривой риска на рис. 1, где $\lambda_E(x)$ — частота событий, 1/год, с последствием x . Риск равен площади под кривой и соответствует среднему размеру последствия x за год. Для уменьшения риска необходимо ограничивать последствия событий с высокой частотой и частоту событий с опасными последствиями. Так кривая риска на рис. 1, *а* приобретает форму рис. 1, *б*.

Области на кривой риска можно условно разделить на две части: вероятные события с ограниченными последствиями и маловероят-

ные события с опасными последствиями. Из разделения областей следуют два аспекта обоснования безопасности проекта реакторной установки. Одним из них является размер допустимых последствий для вероятных событий, другим — допустимая частота для событий с опасными последствиями. Для обоснования последствий используется детерминистический, для оценки частоты превышения опасных последствий — вероятностный анализ безопасности.

Использование рисксформированных методов для проектного и эксплуатационного обоснования реакторных установок рассмотрено в документе МАГАТЭ [3]. Одно из применений