

АССИМИЛЯЦИЯ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ: ТЕКУЩИЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Андрианов А. А.¹, Андрианова О. Н.²
*(Обнинский институт атомной энергетики
НИЯУ МИФИ, Обнинск)*

В статье приводятся результаты анализа состояния и перспектив развития процедур ассимиляции данных в задачах моделирования нейтронно-физических процессов в объектах использования атомной энергии (ОИАЭ), которые применяются с целью уточнения параметров нейтронно-физических моделей ОИАЭ по результатам реакторно-физических экспериментов, оценки и повышения точности расчетного предсказания характеристик проектируемых ОИАЭ, планирования новых информативных экспериментов, близких по своим нейтронно-физическим свойствам к проектируемым ОИАЭ. Приводится классификация используемых подходов к ассимиляции нейтронно-физических данных, отмечены области применения, достоинства и недостатки различных реализаций, выявлены основные тенденции и направления их дальнейшего развития, обозначены актуальные научные и прикладные задачи в рассматриваемой предметной области.

Ключевые слова: ассимиляция данных, машинное обучение, анализ неопределенности, нейтронно-физическое моделирование, объекты использования атомной энергии, реакторно-физические эксперименты.

1. Введение

В различных предметных областях ядерной инженерии широко используются методы математического моделирования физических процессов, протекающих в объектах использования атомной энергии (ОИАЭ). Параметры нейтронно-физических, теплогидравлических, термомеханических и прочих расчетных моделей, разрабатываемых для оценки характеристик ОИАЭ, определяются и при необходимости уточняются по результатам

¹ Андрей Алексеевич Андрианов, к.т.н., доцент (andreyandrianov@yandex.ru).

² Ольга Николаевна Андрианова, к.т.н., (o.n.andrianova@yandex.ru).

сопоставления расчетов с экспериментальными данными либо на основе опыта, квалификации и интуиции специалиста-расчетчика, либо с использованием специализированных математических процедур, известных под названием «ассимиляция данных». Последнее подразумевает постановку, формализацию и решение обратной задачи с использованием различных методов оптимизации. Данный подход получил наибольшее распространение применительно к задачам моделирования нейтронно-физических процессов в ОИАЭ ввиду большого числа параметров, требующих уточнения с целью повышения точности предсказательных способностей соответствующих моделей.

Нейтронно-физическая модель описывает физические процессы, протекающие в ОИАЭ, и связывает характеристики объекта с технологическими параметрами, определяющими геометрию и состав объекта, а также ядерными константами, характеризующими процессы взаимодействия с веществом нейтронов и частиц, образовавшихся в ядерных реакциях [6]. Для решения задач ассимиляции нейтронно-физических данных разработаны разнообразные математические методы, позволяющие оценить, как требуется изменить значения исходных параметров моделей (с учетом их неопределенностей), чтобы модельные расчеты воспроизводили экспериментальные данные и/или данные натуральных наблюдений наилучшим образом в соответствии с выбранной метрикой. Откалиброванная должным образом расчетная модель позволяет не только воспроизводить наилучшим образом характеристики экспериментально изученных систем, но также обеспечивает возможность с приемлемой и прогнозируемой точностью предсказывать характеристики новых объектов, близких по своим физическим свойствам к экспериментально-изученным.

Ключевую роль в ассимиляции нейтронно-физических данных и определении точности расчетного моделирования нейтронно-физических процессов играет реакторно-физический эксперимент [1, 3, 15]. Процедуру ассимиляции данных экспериментов этой категории используют как для уточнения параметров расчетных моделей и совершенствования методов и программных средств расчетного моделирования, так и для повы-

шения точностей расчетного предсказания существующих и проектируемых ОИАЭ, планирования и оценки новых реакторно-физических измерений, характеризующихся повышенной информативностью.

Применение современных методов ассимиляции данных в задачах моделирования нейтронно-физических процессов, протекающих в активных зонах и радиационной защите проектируемых ядерных реакторов, объектах внешнего топливного цикла, в частности, позволяет повысить точность расчетных предсказаний реакторных характеристик, определяющих в конечном счете их экономическую эффективность и конкурентоспособность при безусловном обеспечении требований ядерной и радиационной безопасности [8]. В условиях активизации во всем мире проектных работ по разработке ядерных энерготехнологий и технологий топливного цикла нового поколения возрос интерес к процедурам ассимиляции нейтронно-физических данных ввиду недостаточного объема имеющихся экспериментальных данных, необходимых для обеспечения требуемых точностей предсказания расчетных характеристик объектов, которые еще не получили физическую реализацию.

В работе представлены результаты анализа состояния и перспектив развития процедур ассимиляции нейтронно-физических данных, включая обзор и классификацию используемых подходов к ассимиляции нейтронно-физических данных, отмечены области применения, достоинства и недостатки различных реализаций, выявлены основные тенденции и направления их дальнейшего развития, обозначены актуальные научные и прикладные задачи в рассматриваемой предметной области.

2. Области применения методов ассимиляции нейтронно-физических данных

Ассимиляцию данных можно рассматривать в качестве одной из форм машинного обучения, реализация которой предполагает обращение с реальной физической моделью объектов или процессов, что позволяет осуществить:

- 1) уточнение параметров моделей на основе результатов измерений;
- 2) численные прогнозы физических характеристик исследуемой системы;
- 3) восполнение данных разреженных измерений;
- 4) уточнение условий измерений и снижение их неопределённостей;
- 5) планирование недостающих измерений на экспериментальных установках структурно подобных исследуемой системе.

Наиболее известной областью применения методов ассимиляции данных в ядерной инженерии является оценка нейтронных констант [3, 4, 7]. Вместе с тем запросы практики привели к росту популярности и расширению областей использования процедуры применительно к задачам моделирования нейтронно-физических процессов. Об этом в частности свидетельствует стабильный рост публикаций по применению процедуры в ядерной инженерии в последние годы: в соответствии с данными Международной системы ядерной информации МАГАТЭ [20] общее число публикаций по ассимиляции данных, размещенных в этой системе по состоянию на конец 2022 г., составляет порядка 1050 ед. (цифра соответствует прямому запросу «ассимиляция данных» в систему, вместе с тем в системе размещены также и материалы, которые попадают под обсуждаемую категорию, но используемая авторами терминология отличается от устоявшейся).

Области применения процедуры ассимиляции данных в задачах моделирования нейтронно-физических процессов условно можно разделить на две категории в соответствии с конечным целеполаганием: ассимиляция нейтронно-физических данных проводится с целью уточнения исходных данных и/или расчетных моделей, либо с целью повышения точности расчетного предсказания характеристик, проектируемых ОИАЭ [4]. Вместе с тем следует подчеркнуть, что обозначенное разделение на две категории весьма условно и на практике задачи первой категории могут выступать в качестве предварительного этапа решения задач второй категории.

Решение задач первой категории – уточнение исходных данных и расчетных моделей на основе количественного сопоставления расчетных и экспериментальных данных – направлено на разработку бенчмарк-моделей экспериментов (под бенчмарк-экспериментами понимают реакторно-физические эксперименты реперного класса с минимальными оценёнными погрешностями) с целью их последующего использования для верификации нейтронно-физических кодов, а также для корректировки нейтронных констант.

Задачи второй категории предназначены для объективной оценки неопределённости и повышения точности расчетного предсказания характеристик проектируемых реакторных систем посредством учета результатов реакторно-физических экспериментов. В рамках данной категории задач можно ставить подзадачу по определению точностей расчета реакторных параметров проектируемой системы (прямая задача: по заданным неопределенностям исходных данных с учетом результатов экспериментов оценивается точность расчетного предсказания реакторных характеристик) и подзадачу по определению путей достижения требуемой точности расчетного моделирования (обратная задача: по заданным целевым точностям расчета реакторных характеристик требуется определить каковы должны быть неопределенности входных параметров расчетной модели, обеспечивающие достижение целевых точностей). На практике решение такого рода задач может оказаться, в частности, полезными и при планировании новых информативных экспериментов, близких по своим нейтронно-физическим свойствам к проектируемой системе, что позволит существенным образом уточнить результаты расчетного предсказания нейтронно-физических характеристик проектируемой установки.

3. Общая постановка задачи по ассимиляции нейтронно-физических данных

Общая постановка оптимизационной задачи по ассимиляции нейтронно-физических данных может быть сформулирована следующим образом. Пусть \mathbf{E} – вектор измеренных в экспери-

ментах величин, \mathbf{x} – вектор параметров (нейтронные константы и/или технологические параметры), определяющих нейтронно-физическую модель, которая используется для расчета измеренных величин ($\mathbf{C}(\mathbf{x})$ – вектор соответствующих расчетных значений). Математическая постановка задачи сводится к нахождению минимума целевого функционала с учетом наложенных ограничений на диапазоны варьирования модельных параметров и дополнительных ограничений, артикулирующих требования к качеству параметров модели:

$$(1) \quad \begin{cases} J(\mathbf{x}) \rightarrow \min \\ h_i^{\min} \leq x_i - x_{\text{исх}} \leq h_i^{\max} \quad (i = 1, \dots, N_x) \\ f_k^{\min} \leq F_k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{\text{исх}}, \mathbf{E}, \mathbf{C}(\mathbf{x})) \leq f_k^{\max} \quad (k = 1, \dots, K) \end{cases}$$

где $\mathbf{x}_{\text{исх}}$ – вектор исходных значений параметров (нейтронные константы и/или технологические параметры), h_i – ограничения на смещения параметров x_i , F_k – метрика расчетно-экспериментальных расхождений для одного или нескольких измерений, f_k – ограничения на F_k (min и max – нижняя и верхняя граница, соответственно), \mathbf{W} – диагональная матрица весов экспериментов, \mathbf{M}_x и \mathbf{M}_E – ковариационные матрицы параметров и измерений соответственно ($\mathbf{M}_{ii} = d_i$ (дисперсия) для $i = j$; $\mathbf{M}_{ij} = \text{cov}(x_i, x_j)$ для $i \neq j$).

Целевая функция $J(\mathbf{x})$ устроена следующим образом:

$$(2) \quad J(\mathbf{x}) = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{исх}})^T \mathbf{M}_x^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{исх}}) + (\mathbf{E} - \mathbf{C}(\mathbf{x}))^T (\mathbf{W}^T \mathbf{M}_E \mathbf{W})^{-1} (\mathbf{E} - \mathbf{C}(\mathbf{x})).$$

Один из членов определяет разницу между вектором измеренных значений \mathbf{E} и отображением набора исходных параметров в пространство рассчитываемых характеристик $\mathbf{C}(\mathbf{x})$ (в идеале исходные модельные параметры должны быть таковыми, чтобы этот член был равен нулю). Вместе с тем другой член целевой функции ограничивает возможность делать чрезмерно большими смещения в исходных параметрах (что приводит к росту целевой функции J даже в случае, если главный член, характеризующий расхождения расчетных и измеренных значений, будет приближаться к нулю).

С целью учета неопределенностей в исходных данных и результирующих характеристиках оба члена взвешиваются с обратными ковариационными матрицами ошибок \mathbf{M}_x и \mathbf{M}_E , что

позволяет искать такие смещения в исходных данных, которые не выходили бы за диапазоны их неопределенности, а расхождения расчетных и измеренных значений лежали бы в пределах погрешности измеренных величин.

На практике зачастую возникают ситуации, когда приходится включать в анализ разноплановые измерения, выполненные с использованием различающихся по точности методиками и имеющие различную степень подобия к целевой системе. Эти обстоятельства могут быть учтены путем введения матрицы весовых коэффициентов измерений \mathbf{W} , определяемой либо экспертным образом, либо оцениваемой на основе т.н. коэффициентов подобия [4] экспериментальных и целевых систем.

Таким образом процедура ассимиляции данных сводится к оптимизационной задаче (предполагается, что используемая нейтронно-физическая модель корректно отражает особенности предметной области и необходимо только уточнить ее параметры). Решение оптимизационной задачи – скорректированный набор исходных модельных параметров – обозначают следующим образом:

$$(3) \quad \mathbf{x}(\mathbf{E}) = \arg \min_{\mathbf{x}} (J(\mathbf{x}; \mathbf{E}))$$

$$\text{subject to } h_i^{\min} \leq x_i - x_{\text{исх}} \leq h_i^{\max} \quad (i=1, \dots, N_x)$$

$$f_k^{\min} \leq F_k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{\text{исх}}, \mathbf{E}, \mathbf{C}(\mathbf{x})) \leq f_k^{\max} \quad (k=1, \dots, K)$$

Одна из главных трудностей, с которыми приходится сталкиваться при практическом применении процедуры ассимиляции нейтронно-физических данных – проблема нехватки экспериментальных данных по измерениям нейтронно-физических характеристик на установках структурно подобных целевым объектам (из-за высокой стоимости соответствующих реакторно-физических экспериментов), что сказывается на ограничении возможностей выполнения всестороннего обоснования показателей эффективности и безопасности проектируемых установок. Эта проблема приводит к необходимости вовлечения в процедуру ассимиляции нейтронно-физических данных всей доступной экспериментальной информации, полученной в рамках альтернативных экспериментальных программ. В связи с чем возникает задача анализа разноплановых измерений, которые зача-

стую могут характеризоваться большими неопределённостями измерений и оказаться противоречивыми друг другу. Противоречивость экспериментальных данных проявляется в том, что рассмотрение таких экспериментальных данных по отдельности приводит к противоположным тенденциям в смещениях $S(x)$ и параметрах x .

Следует подчеркнуть, что ассимиляцию данных следует рассматривать не как формальный процесс, а как комплексную активность, содействующую всесторонней проработке и формированию более глубокого понимания природы моделируемых физических процессов и явлений, степени влияния неопределенностей в исходных данных на рассчитываемые параметры, включая ответ на вопрос как неопределенности в рассчитываемых параметрах могут быть снижены за счет учета доступной экспериментальной информации. В этой комплексной активности, которая, как правило, носит итерационный характер, немаловажную роль играют также и подготовительный этап, связанный с подготовкой исходных данных для ассимиляции, и этап, на котором осуществляется анализ результатов ассимиляции, которые не поддаются формализации и автоматизации.

4. Классификация методов ассимиляции нейтронно-физических данных

Используемые подходы к ассимиляции данных в задачах моделирования нейтронно-физических процессов могут быть классифицированы по следующим признакам:

- 1) по типу решаемой оптимизационной задачи – условная или безусловная оптимизация (с учетом или без учета жестких ограничений на диапазоны смещения параметров и/или расчётных значений измеренных характеристик, полученных на основе откорректированных (смещенных) параметров);
- 2) по типу используемой нейтронно-физической модели – линеаризованная или нелинеаризованная модель (линеаризация модели предполагает использование аппарата коэффициентов чувствительности, альтернативным вариан-

том является построение нелинейной регрессионной модели измерений или выполнение прямых расчетов, предполагающих формирование на основе набора исходных параметров набора расчетных значений измеренных характеристик);

- 3) по числу целевых функций, определяемых качество решения (набора рекомендуемых модельных параметров: ядерных констант и технологических параметров) – одноцелевая или многоцелевая оптимизация (в первом случае смещения в модельных параметрах и расчетно-экспериментальные расхождения агрегируются в единый целевой функционал, во втором – соответствующие метрики рассматриваются независимо в виде самостоятельных целевых функций);
- 4) по типу ограничений, определяющих допустимое множество – уравнения, определяющие допустимое множество, являются линейными или нелинейными функциями;
- 5) по типу распределения ошибок измерений – ошибки измерений подчиняются или не подчиняются нормальному распределению.

Для каждой реализации процедуры ассимиляции нейтронно-физических данных разрабатывают собственные методы решения, которые можно объединить в три группы: детерминированные (оперирующие только средними значениями и ковариациями модельных параметров), стохастические (реализующие рекурсивное байесовское оценивание функции плотности вероятности модельных параметров с использованием данных измерений и математической модели нейтронно-физического процесса), гибридные (комбинированные методы, предполагающие совместное использование элементов детерминистических и стохастических подходов).

Начиная 60-х годов прошлого века ассимиляция нейтронно-физических данных осуществлялась с использованием детерминированных подходов, прежде всего на основе обобщенного метода наименьших квадратов в связке теорией возмущений, разработанной в рамках теории переноса нейтронов [2–4].

Позднее были предложены многочисленные альтернативные реализации процедуры, характеризующиеся большей гибкостью и универсальностью, появление которых оказалось возможным благодаря развитию соответствующего математического аппарата и росту вычислительных мощностей.

На современном этапе возможной стала реализация прецизионных стохастических методов ассимиляции данных применительно к задачам моделирования нейтронно-физических процессов, в которых отсутствуют какие-либо существенные упрощения как в части представления модели физических процессов, так и в части, связанной с представлением информации о неточности параметров модели и экспериментальных данных [7–14].

5. Текущее состояние и перспективы развития ассимиляции нейтронно-физических данных

В настоящее время существует множество возможных реализаций процедуры ассимиляции нейтронно-физических данных, каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки.

Классический подход (1970 – 1980 гг) на основе метода максимального правдоподобия или обобщенного метода наименьших квадратов [3–5, 7, 17] – безусловная оптимизация в предположении нормальности распределений ошибок исходных параметров и возможности линеаризация нейтронно-физической модели посредством расчета коэффициентов чувствительности. В этом случае решение оптимизационной задачи по ассимиляции данных в конечном счете сводится к системе линейных уравнений, которая может быть решена с использованием методов линейной алгебры. Основным достоинством такого подхода является его простота, возможность сведения сложной нейтронно-физической модели к ее эскизному описанию при помощи коэффициентов чувствительности оцениваемых реакторных характеристик к набору модельных параметров, и как следствие сокращение машинного времени на выполнение расчетов. К недостаткам подхода можно отнести отсутствие возможности наложения ограничений на уточняемые данные, а

также отсутствие встроенных механизмов диагностики нефизичности решений, возникающих при рассмотрении противоречивых экспериментальных данных. Данный подход неприменим при наличии больших неопределённостей во входных данных, а также когда ошибки измерений не подчиняются нормальному распределению.

Расширить область применения классического подхода и вместе с тем сохранить его основное преимущество – простоту реализации – позволяет широко известный метод решения задач на условный экстремум, заключающийся в сведении этих задач к задачам на безусловный экстремум с помощью вспомогательной функции, называемой функцией Лагранжа. Применение данного подхода к задачам ассимиляции нейтронно-физических данных позволяет искать такие поправки к исходным данным, которые обеспечивали бы, например, четкое выполнение заданных пользователем требований к точности расчетного описания экспериментов (например, удовлетворить требованию точного равенства расчетных и экспериментальных значений по итогам калибровки исходных данных). Отметим, что несмотря на методическую прозрачность подхода к решению условных оптимизационных задач с использованием множителей Лагранжа, на практике для ассимиляции нейтронно-физических данных с учетом дополнительных требований на точность расчетного предсказания реакторных характеристик и/или диапазоны варьирования калибруемых параметров, более целесообразным и эффективным представляется использование специализированных пакетов программ, позволяющих решать задачи многопараметрической нелинейной условной оптимизации, что делает возможным в автоматическом режиме учитывать разнообразные ограничения в виде равенств и неравенств [2].

Для современных подходов к ассимиляции нейтронно-физических данных (2000 г. – по н.в.) характерен переход от безусловной к условной постановке оптимизационной задачи, появлению возможности прямого учета разнообразных требований к уточняемым данным, отсутствие необходимости использования линейного приближения для представления нейтронно-физической модели. В связи с этим в последние годы всю боль-

шую популярность набирает Байесовский (стохастический) подход к реализации метода максимального правдоподобия для задач ассимиляции нейтронно-физических данных, который характеризуется большей гибкостью, поскольку не имеет каких-либо ограничений на вид функций распределения ошибок и не требует введения дополнительных предположений, например, необходимость линеаризации расчетной модели [10–14, 16, 18].

В последнее время также активно развиваются методики идентификации и вовлечения в анализ противоречивых экспериментов, а также возможности реализации альтернативных стратегий корректировки, осуществляется разработка автоматизированных механизмов проверки качества и физичности решений и пр. Это приводит к усложнению методов решения, повышению требований к качеству исходных данных, необходимости применения времязатратных алгоритмов, например, стохастической или нелинейной многопараметрической оптимизации.

Следует отметить, что в настоящее время продолжают развиваться как стохастическое, так детерминистическое и направления к ассимиляции нейтронно-физических данных [8, 10, 19]. С одной стороны, происходит совершенствование стохастических методов ассимиляции данных применительно к прецизионным нейтронно-физическим моделям, предполагающим различные реализации методов Монте-Карло на основе байесовского подхода, что позволяет решать задачу калибровки расчетных моделей без каких-либо дополнительных приближений при моделировании нейтронно-физических процессов [10].

С другой стороны, ввиду того, что стохастические методы требуют больших вычислительных мощностей и применения параллельных вычислений на суперкомпьютерах, наблюдается планомерное развитие и детерминистических подходов. Тот факт, что соответствующие модификации обеспечивают возможность выявления основных влияющих на результаты расчетов факторов, это позволяет значительно сократить затраты машинного времени на единичный расчет без потери точности расчетного описания экспериментов. В частности, детерминистические подходы остаются основным инструментом ассими-

ляции нейтронно-физических данных в динамических задачах (задачи нейтронной кинетики и динамики реакторов, нуклидной кинетики и т.п.).

Отчасти отмеченное обстоятельство также подтолкнуло к развитию и гибридных или комбинированных подходов [11, 18], когда на основе упрощенных линейризованных моделей с минимальными затратами машинного времени отслеживается влияние отдельных факторов и устанавливаются наиболее существенные функциональные связи между параметрами модели и исследуемой расчетной характеристикой объекта. Далее на основе этой информации и итерационных процедур производят корректировку параметров прецизионной нейтронно-физической модели.

Развитие методов машинного обучения и повсеместное внедрение цифровых двойников актуализирует работы по формированию оцифрованных баз оцененных нейтронно-физических данных и развитию в нейтронно-физических кодах функционала, обеспечивающего проведение анализа чувствительности и неопределенности в отношении используемых исходных данных [9]. Имеет место тенденция к формализации и автоматизации процедур ассимиляции нейтронно-физических данных с целью минимизации влияния субъективной экспертной оценки на всех этапах реализации процедуры.

Вместе с тем в настоящее время признается, что ассимиляция нейтронно-физических данных не может бы полностью формализована и автоматизирована, чтобы исключить потребность в эксперте. Решение конкретных практических задач является нетривиальным и итерационным процессом, реализация которого требует расчетной интуиции и опыта работы с нейтронно-физической моделью, позволяющих корректно видоизменять модель по мере накопления информации по результатам применения процедуры ассимиляции нейтронно-физических данных.

6. Заключение

Практическое использование процедуры ассимиляции данных в ядерной инженерии началось с 60-х годов XX века с целью максимально эффективным образом использовать немногочисленные экспериментальные данные при решении задач проектирования ядерных реакторов и уточнения параметров нейтронно-физических моделей (нейтронных констант). Позднее с развитием вычислительно-методической базы расширилась область применения методов ассимиляции данных, которые стали использоваться не только с целью уточнения исходных параметров нейтронно-физических моделей, но и с целью оценки информативности ранее выполненных и планирования новых экспериментов, близких по своим физическим свойствам к проектируемой системе, повышения точности расчетного предсказания характеристик, проектируемых ОИАЭ.

На сегодняшний день можно выделить следующие основные направления развития методов ассимиляции данных применительно к задачам моделирования нейтронно-физических процессов:

- 1) повсеместное внедрение в нейтронно-физические расчетные коды функционала, обеспечивающего возможность проведения анализа чувствительности и неопределенности в отношении используемых исходных данных (как ядерных констант, так и технологических параметров) и уточнения последних на основе экспериментальных данных с использованием разнообразных алгоритмов ассимиляции данных;
- 2) расширение области применения методов ассимиляции нейтронно-физических данных на динамические задачи, описывающие изменения характеристик ОИАЭ во времени (например, изменение элементного и нуклидного состава топлива вследствие его облучения в реакторе и радиоактивного распада нуклидов);
- 3) развитие гибридных методик ассимиляции данных, сочетающих в себе достоинства как детерминистических, так и стохастических подходов;

- 4) развитие методик вовлечения в процедуру ассимиляции нейтронно-физических данных большого числа экспериментов по измерению различных реакторно-физических характеристик, а также экспериментов, имеющих большие неопределённости в условиях проведения измерений, включая эксперименты, результаты измерений которых противоречат данным других экспериментов и пр.;
- 5) подготовка методической и инструментальной баз для экспертно-независимой ассимиляции нейтронно-физических данных в будущем: оцифровка реакторно-физических экспериментальных данных, полученных в разные годы, артикуляция, формализация и автоматизация методик оценки погрешностей измерений, восполнение недостающих экспериментальных данных расчетными данными, полученными на цифровых двойниках исследовательских стендов и установок.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10154, <https://www.rscf.ru/project/23-29-10154>.

Литература

1. АНДРИАНОВ А.А., АНДРИАНОВА О.Н., ГОЛОВКО Ю.Е. *Методика оценки интегральных экспериментов для использования в задаче оценки точности нейтронно-физических расчетов* // Депонированная рукопись. – № 68-V2021. – 2021. – 58 с.
2. АНДРИАНОВ А.А., АНДРИАНОВА О.Н., КОРОВИН Ю.А. и др. *Программный комплекс оптимизации параметров нейтронно-физических моделей с учетом результатов интегральных экспериментов* // Известия вузов. Ядерная энергетика, – 2023, – № 2 (в печати)
3. ВАНЬКОВ А.А., ВОРОПАЕВ А.И., ЮРОВА Л.Н. *Анализ реакторно-физического эксперимента*, М., Атомиздат, 1977. – 88 с.

4. УСАЧЕВ Л.Н., БОБКОВ Ю.Г. *Теория возмущений и планирование эксперимента в проблеме ядерных данных для реакторов*, М., Атомиздат, 1980. – 88 с.
5. УСЫНИН Г.Б., КАРАБАСОВ А.С., ЧИРКОВ В.А. *Оптимизационные модели реакторов на быстрых нейтронах*. – М.: Атомиздат, 1981. – 232 с.
6. SACUCI D.G., BUJOR M. *Sensitivity and uncertainty analysis, data assimilation, and predictive best-estimate model calibration* / Handbook of Nuclear Engineering. Springer, Boston. – 2010. https://doi.org/10.1007/978-0-387-98149-9_17 (дата обращения: 18.03.2023).
7. DRAGT J.B. *Statistical considerations on techniques for adjustment* // RCN-122. – Reactor Centrum Nederland. – 1970. – P. 85–105.
8. IVANOV E., SAINT-JEAN C., Sobes V. *Nuclear data assimilation, scientific basis and current status* // EPJ Nuclear Sci. Technol.– 2021. – <https://doi.org/10.1051/epjn/2021008> (дата обращения: 18.03.2023).
9. GRECHANUK P., RISING M.E., PALMER T.S. *Using machine learning methods to predict bias in nuclear criticality safety* // Jour. of Computational and Theoretical Transport. – 2019. – Vol. 47. – P. 552–565.
10. HOEFER A., BUSS O. *Assessing and improving model fitness in MOCABA data assimilation* // Ann. Nucl. Energy. – 2021. – Vol. 162. – P. 10–21.
11. HOEFER A., BUSS O., HENNEBACH M. et.al. *MOCABA: A general Monte Carlo–Bayes procedure for improved predictions of integral functions of nuclear data* // Ann. Nucl. Energy. – 2015. – Vol. 77. – P. 514–521.
12. HOEFER A., BUSS O., SCHMID M. *Applications of Multivariate Normal Bayesian Models in Nuclear Engineering* // Nuclear Technology. – 2019. – Vol. 205, No. 12. – P. 1578–1587.
13. KONING A.J. *Bayesian Monte Carlo method for nuclear data evaluation*, Nucl. Data Sheets. – 2015. – Vol. 123. – P. 207–213.

14. NEWELL Q., SANDERS C. *Stochastic uncertainty propagation in Monte Carlo depletion calculations* // Nuclear Science and Engineering. – 2015. – Vol. 179, No. 3. – P. 253–263.
15. PALMIOTTI G., SALVATORE M. *The role of experiments and of sensitivity analysis in simulation validation strategies with emphasis on reactor physics* // Ann. Nucl. Energy. – 2013. – Vol. 52. – P. 10–21.
16. ROCHMAN D., SCIOLLA C.M. *Nuclear Data Uncertainty Propagation for a Typical PWR Fuel Assembly with Burnup*, Nuclear Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 46, No. 3. – P. 353–362.
17. ROWLANDS J.L., MACDOUGALL L.D. *The use of integral measurements to adjust cross-sections and predicted reactor properties* // Proceedings of the International Conference on Fast Critical Experiments and their Analysis. – ANL-7320. – 1966.
18. REARDEN B.T. *Perturbation theory eigenvalue sensitivity analysis with Monte Carlo techniques* // Nuclear Sci. Eng. – 2004. – Vol. 146, No. 3. – P. 367–382.
19. SIEFMAN D., HURSIN M., ROCHMAN D. et.al. *Stochastic vs. sensitivity-based integral parameter and nuclear data adjustments* // Eur. Phys. J. Plus. – 2018. – Vol. 133, No. 12. – P. 429–438.
20. <http://www.inis.iaea.org> (дата обращения: 18.03.2023).

DATA ASSIMILATION IN NEUTRONICS MODELLING: CURRENT STATUS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Andrei Andrianov, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering NRNU MEPhI, Obninsk, Ph.D., Associate Professor (andreyandrianov@yandex.ru)

Olga Andrianova, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering NRNU MEPhI, Obninsk, Ph.D. (o.n.andrianova@yandex.ru).

Abstract: The article presents an analysis of the current state and prospects for the development of data assimilation procedures in neutronics modelling. These procedures are used to refine the parameters of neutronics models based on reactor experiment results, improve the accuracy of calculations predicting the characteristics

of nuclear facilities under development, and plan informative experiments that closely match the neutronics properties of the facilities being designed. The article provides a classification of the approaches used in data assimilation for neutronics modelling, discusses the areas of application, advantages, and disadvantages of various implementations, identifies the main trends and directions for further development, and considers the current scientific and applied problems in the subject area.

Keywords: data assimilation, machine learning, uncertainty analysis, neutronics modelling, nuclear facilities, reactor experiments

УДК 621.039.51

ББК 31.4

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии ...заполняется редактором...*

*Поступила в редакцию ...заполняется редактором...
Опубликована ...заполняется редактором...*