

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕЙТРОННАЯ КИНЕТИКА.  
ТЕСТОВЫЕ ЗАДАЧИ. SUMMING\_UP

Зизин М.Н.

Жизнь – это земледелие. Надо найти хороший кусок плодородной земли, распахать почву и запастись терпением. Урожай приходит позже, а главное дело делается тогда, когда ни малейших результатов ещё не видно.

*Герберт Кауфман*

# Введение (1)

Доклад инспирирован выходом в свет книги (Пространственная нейтронная кинетика. Тестовые задачи. Учебное пособие / Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 272 с), над которой автор с разной степенью интенсивности трудился последние десять лет.

Этой теме отдано более четверти века и кажется возможным подвести некоторые итоги.

- В пространственной нейтронной кинетике две основные задачи – решение уравнения переноса и обращённое решение уравнения кинетики (ОРУК). Большая часть проблем связана с последним. Теоретически постулируемая тождественность значений реактивности, получаемых из ОРУК и прямых расчётов критичности на момент окончания возмущения, далеко не всегда получается на практике, особенно при многогрупповых вычислениях. Автор только к 2020 году с хорошей точностью подтвердил на практике тождественность реактивностей при расчётах БР. Все эти годы накапливаемые знания в виде программ, их сочленений и наборов данных помещались в базу данных системы ShIPR. Писались формулы, пополнялся набор тестов.

# Введение (2)

- Самые большие трудности всегда были с кроссверификацией создаваемых программ.
- В 2018 г. с трудом уговорённый Е.Ф. Селезнёв предложил тест, сделанный из стационарной модель быстрого реактора с металлическим топливом МЕТ-1000. Большие (~ 25 %) расхождения в расчётах мощности и реактивности при моделировании мгновенного падения всех органов регулирования стимулировали привлечение к процессу кроссверификации П.А. Фомиченко, К.Ф. Раскача и В.Г. Зимина. Выпали только результаты Е.Ф. Селезнёва. Но именно на возне с этим тестом удалось свести концы с концами, вылизать формулы и программы, и результаты прямых расчётов реактивности наконец полностью совпали с расчётами по ОРУК.

## *Основные достижения (1)*

1. В расчёты реактивности внедрена формула ОРУК с дифференциальной формой источника ЗН, не содержащая интеграла и первая доказавшая реальность достижения тождественности значений реактивности, получаемых из ОРУК и в прямых расчётах критичности. Это обосновало возможность использования последних как эталона при оценке точностей разных вариантов оценки реактивности.
2. Подтверждена гипотеза, что кроме неточностей в реализуемых формулах, основной причиной несовпадения реактивностей, рассчитанных прямым методом и с помощью ОРУК, являются сложности вычисления интеграла в формуле ОРУК. Иногда причиной расхождений бывает неоправданное использование приближения мгновенного скачка, когда пренебрегают вкладом в реактивность членом с производной потока по времени.
3. Выведены и проверены на практике формулы усреднения кинетических параметров и спектров нейтронов по нуклидам и физическим зонам.

## ***Основные достижения (2)***

4. Получение точных результатов обеспечили отдельные источники мгновенных и ЗН на всех этапах расчёта, включая стационарные расчёты потоков и ценностей нейтронов.

5. Внедрена стратегия пересчёта концентраций предшественников ЗН в заранее заданном числе обязательных внешних итераций внешних итераций при решении нестационарного уравнения переноса, что позволяет повысить точность расчёта реактивности.

6. Проверена возможность использования стационарной программы переноса нейтронов с внешним источником вместо нестационарной.

7. Внедрён предварительный расчёт плотности нестационарных потоков без внесения возмущений, что выявляет ошибки в программах и/или в исходных данных на более ранних этапах длительного вычислительного процесса.

8. Исследована информативность моделирования мгновенного сброса ОР.<sub>5</sub>

## *Основные достижения (3)*

9. Реализована возможность расчётов с переменным шагом по времени при моделировании движения ОР на двух этапах - при опускании ОР и после остановки. До вычищения алгоритмов расчёты с переменным шагом по времени давали заметные ошибки.
10. Созданы программы выбора расположения ионизационных камер на основе результатов моделирования нескольких сценариев движения органов регулирования.
11. Исследована система из девяти тестовых задач для пространственной нейтронной кинетики с разумным сочетанием точности и времени расчёта. Часть проблем может решаться на редуцированных моделях с симметрией  $60^\circ$ .

## *Нерешённые проблемы*

1. В 2-групповой задаче с моделированием движения ОР в реакторах типа ВВЭР были замечены существенные расхождения значений реактивности в прямых расчётах критичности и с помощью ОРУК, получаемых в процессе движения органов регулирования. В многогрупповых расчётах этот эффект не наблюдался
2. При расчёте реактивности с помощью классического варианта ОРУК не найден способ использования ценности нейтронов на тот же момент времени, на который рассчитываются потоки нейтронов,
3. При моделировании перекомпенсации симметрично расположенных органов регулирования в быстром реакторе. мощность после перекомпенсации не выходит на исходный уровень.

## Общие выводы по результатам создания и расчёта тестов

1. Пространственно-кинетические тесты должны включать в себя не только изменение мощности во времени, но и расчёт изменения реактивности во времени, а также в ряде случаев расчёт локальных значений потока.
2. Для максимального приближения ОРУК к тождеству разделение сечений размножения, используемых с соответствующими спектрами деления, надо внедрять везде – и при расчёте плотности начальных стационарных потоков, и при расчёте ценностей, и при расчёте ЦНД и эффективной доли ЗН. И обязательно использовать «возмущённую» ценность при решении задач с вводом органов регулирования.
3. Для недиффузионных программ с временной зависимостью следует выбирать тесты, где недиффузионность значимо влияет на мощность и реактивность.
4. Подстановка в ОРУК потоков, имитирующих токи отдельных ионизационных камер, даёт ухудшающиеся результаты при реактивностях больше  $\beta_{\text{eff}}$ , когда перестаёт работать точечное приближение уравнения кинетики.

## Благодарения

Безмерно благодарен коллегам, с кем обсуждались вопросы, так или иначе касающиеся пространственной нейтронной кинетики, констант и стиля изложения, и общение с которыми способствовало созданию книги. Вот этот не очень длинный и возможно неполный список:

Абрамов Борис Дмитриевич

Иванов Лев Дмитриевич

Матвеев Игорь Павлович

Кощеев Владимир Николаевич

Серёгин Анатолий Степанович

Шишков Лев Константинович

Алёшин Сергей Сергеевич

Гольцев Александр Олегович

Гуревич Михаил Исаевич

Давиденко Владимир Дмитриевич

Забродская Светлана Васильевна

Зарицкий Сергей Михайлович

Зимин Вячеслав Геннадиевич

Ковалишин Алексей Анатольевич

Кряквин Леонид Васильевич

Мантуров Геннадий Николаевич

Марова Елена Викторовна

Николаев Александр Александрович

Николаев Марк Николаевич

Овдиенко Юрий Николаевич

Питилимов Василий Александрович

Попыкин Александр Иванович

Проняев Владимир Григорьевич

Селезнёв Евгений Фёдорович

Суслов Игорь Рюрикович

Терешонок Виктор Александрович

Цибуля Анатолий Макарович

Цибульский Виктор Филиппович

Цыганов Сергей Вячеславович

Отдельное спасибо научному редактору Фомиченко Петру Анатольевичу  
и рецензентам

Ельшину Александру Всеволодовичу, Раскачу Кириллу Фёдоровичу, Тихомирову Георгию Валентиновичу.

Спасибо за долготерпение