

539.125.52(049.3)

**МЕТОДЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО АНАЛИЗА В ТЕОРИИ
ПЕРЕНОСА НЕЙТРОНОВ**

Marjan Ribarič. Functional-analytic Concepts and Structures of Neutron Transport Theory. Vol. I—II. Ljubljana, The Slovene Academy of Sciences and Arts—the Institute «Jozef Stefan», University of Ljubljana, 1973, 1105 p.

В книге приводится оригинальная трактовка теории переноса нейтронов, основным понятием которой является нестационарное альbedo. В такой постановке данный вопрос не изучался, хотя в литературе по теории переноса, в том числе в отечественной литературе, имеются исследования по теории стационарного альbedo. Основное отличие альбедного подхода от традиционного «полевого» состоит в следующем.

При традиционном рассмотрении переноса нейтронов с помощью кинетического уравнения Больцмана основу составляют микроскопические константы, описывающие взаимодействие нейтронов с ядрами среды, в которой осуществляется этот процесс. Предлагаемый автором метод позволяет в принципе отказаться от микроскопических констант как основы расчета и заменить их на некоторые макроскопические константы отдельных частей тела. Совокупность таких макроскопических констант описывает нестационарное альbedo, связывающее выходящий через границу тела ток нейтронов с входящим током. При таком подходе задачу изучения переноса нейтронов в некотором сложном теле можно трактовать как задачу получения информации о некотором объекте при условии, что известны свойства всех частей, из которых состоит этот объект. При этом, естественно, рассматриваемые характеристики (макроскопические параметры) частей объекта не обладают свойством аддитивности.

Развиваемый автором метод при условии, что макроскопические параметры известны, обладает большой привлекательностью, так как позволяет упростить вычислительные процедуры.

Основное содержание книги состоит в строгом математическом обосновании этого подхода методами функционального анализа. Последовательно определены величины, используемые в теории переноса нейтронов, и изучены их свойства.

Предположения, сделанные автором, обусловлены физической сущностью явления переноса либо могут быть осмыслены, а возможно, и доказаны, исходя из результатов традиционной (полевой) теории переноса.

В книге обсуждены условия и сформулированы требования к экспериментальным измерениям тока нейтронов через поверхность. Это позволяет математически корректно интерпретировать экспериментальные измерения параметров нестационарного альbedo.

В заключение вводной части рецензии отметим, что альбедную теорию переноса нейтронов можно рассматривать как еще одного представителя концепции «вход» — «выход», или теории «черного ящика», успешно используемой во многих областях физики и техники, например, при исследовании соотношений между изображением и образом в теории оптических инструментов и в радиотехнике.

Перейдем к более подробному рассмотрению содержания книги. Весь основной материал работы помещен в первом томе. В части I вводится оператор нестационарного альbedo для одного тела и изучаются его свойства на ограниченном и неограниченном отрезке времени. Основным уравнением, определяющим \hat{A} , оператор нестационарного альbedo, является уравнение $i_{\pm} = \hat{A}i_{\mp} + q$, где i_{\pm} — выходящий (входящий) ток нейтронов, q — выходящий ток, не зависящий от входящего. Оператор \hat{A} определен в пространстве L'_{M_0} -функций с интегрируемым модулем, определенных на множестве $M_0 = B \times [0, c] \times \Omega \times [0, t_0]$, где B — поверхность тела, c — максимальная скорость нейтронов, Ω — единичная сфера в пространстве скоростей, $[0, t_0]$ — отрезок времени. Для анализа задачи вводится конус $K \subset L'_{M_0}$ неотрицательных функций.

Устанавливается, что при некоторых специальных предположениях оператор \hat{A} является обобщенным оператором Вольтерра. Распространяя временной интервал до ∞ , автор анализирует асимптотическое альbedo. Подкритическое тело определяется как тело, асимптотический ток для которого Ai_{-s} (индекс s означает стационарный режим) заключен между двумя убывающими экспонентами.

В части II изучаются свойства системы, состоящей из нескольких тел. Фазовое пространство теперь помимо внешней границы включает также поверхность контакта тел системы $B_c = \sum_{K_1, K_2} B_{K_1} \cap B_{K_2}$. Тела предполагаются связанными, исключается перенос нейтронов через вакуум, однако допускаются области полной черноты. Для характеристики процессов деления вводят параметр $\lambda(f)$ — проникаемость поверхностного слоя f .

В этих условиях автор получает для системы N тел в линейной постановке следующее основное уравнение:

$$i_u = \hat{A}_u i_u + s + i_{-}, \quad i_u \in K_u,$$

$$\hat{A}_u = \sum_{k=1}^N \lambda(f) A_k \lambda(f'), \quad s = \sum_{k=1}^N \lambda(f) q_k, \quad f \in B,$$

где i — ток нейтронов, приходящий извне в систему через внешнюю границу $B = \bigcup_k B_k = \sum_{k, k'} B_k \cap B_{k'}$. Отличие тока i_u для системы тел от тока i для одного тела состоит в том, что последний определен только на границе тела, в то время как ток i_u определен также на границах контакта отдельных частей тела.

Нестационарная задача анализируется для постоянной проникаемости $\lambda(f)$. Изучаются спектральные свойства решений, и указывается на наличие сплошного

и дискретного спектра, которые называются микро- и макрорезонансами соответственно. Изучаются также собственные функции оператора $\hat{A}_{u,s}$ для прямой и сопряженной задач. В этой же части рассмотрена роль запаздывающих нейтронов для почти-критического реактора. Полученные результаты согласуются с результатами точечной кинетики.

В части III первого тома излагается теория линейных измерений. Дается определение линейного, положительного и нестационарного измерений. Это делается с целью избежать противоречий между измерением и интерпретацией результата. Изучается возможность непрерывной аппроксимации оператора альbedo. Показано, что если ядро этого оператора разложить в ряд Хаара, то коэффициенты разложения можно трактовать как экспериментально наблюдаемые величины.

Вычислительные аспекты проблемы определения свойств системы, исходя из альбедных свойств ее частей, представлены в части IV. Изучаются различные вопросы существования конечномерных приближений, сохраняющих физические особенности задачи как в стационарном, так и в нестационарном случаях, а также способы решения конечномерных задач.

В части V рассмотрен вопрос о теоретико-транспортной аппроксимации оператора альbedo. Исходной физической посылкой для этого является учет того, что некоторая часть нейтронов может пройти через тело без взаимодействия. Поэтому оператор альbedo представлен в виде суммы $\hat{A} = \hat{A}_n + \hat{S}$, где $n \in [0, 1]$; \hat{S} — положительный, причинный, непрерывно аппроксимируемый оператор, такой, что $\hat{S}i_-$ — зависит от i_- только через процессы рассеяния или деления. Оператор \hat{P}_n предполагается положительным, причинным и слабо сходящимся к нулю при $n \rightarrow 0$. Изучаются свойства оператора \hat{A}_n , и отмечается большая информативность такого подхода.

В этой же части рассмотрен вариант нелинейного оператора альbedo. Нелинейность может быть вызвана самыми различными причинами, такими, как выгорание топлива, отравление продуктами деления и т. д. Изучаются вопросы линеаризации существования и единственности решения уравнения с нелинейным оператором альbedo. В заключение первого тома разбирается связь методов альбедной теории с методами инвариантного вложения, передаточных матриц, а также традиционной «полевой» теории.

Второй том монографии состоит из двух частей. Часть I содержит справочный материал по функциональному анализу, где приводятся свойства пространства, конусов и операторов, используемые в тексте первого тома. Следует отметить, что автор не использует сильные результаты по теории линейных положительных операторов, полученных в известных монографиях М. А. Красносельского и др. Это приводит к ряду дополнительных построений.

В части II содержится большая часть доказательств теорем и вывод многих выражений, использованных в основном тексте.

В книге приведена весьма большая библиография по исследуемому вопросу (667 наименований) и дан авторский индекс.

Отметим, что все вопросы, относящиеся к задаче переноса нейтронов, решены в книге на высоком математическом уровне и методами, которые стали проникать в теорию переноса лишь в самые последние годы. Все это делает книгу весьма полезной как для тех, кто только начинает работать в области теории переноса, так и для тех, кто давно уже работает в этой области и хотел бы ознакомиться с современными математическими методами, применяемыми в этой области физики.

Что же касается достоинств развитого в книге альбедного метода решения задач теории переноса, то главным из них, на наш взгляд, является то, что предполагается использовать экспериментальные данные об отдельных частях системы и, основываясь на этом, получать информацию о переносе нейтронов во всей системе. При этом отпадает необходимость знать ядерно-физические константы среды. Однако пока трудно оценить масштаб тех технических сложностей, которые могут возникнуть при практической реализации этой идеи.

В. М. Новиков, А. И. Попыкин