

Содержание урана в воде, мкг/мл

Концентрация урана		Концентрация калия	Концентрация урана		Концентрация калия
заданная	измеренная		заданная	измеренная	
2,0	1,61	0,5	8,0	9,99	1,0
3,0	4,66	0,5	2,0	3,02	2,0
6,0	7,57	0,5	6,0	7,63	2,0
2,0	2,70	1,0	10,0	9,72	2,0
5,0	4,26	1,0			

Одним из главных преимуществ возбуждения характеристического излучения α -частицами по сравнению с фотонами является отсутствие фона рассеянного излучения, что позволяет получить высокую чувствительность анализа. Порог чувствительности, определяемый как содержание урана в мишени, при котором число импульсов в пиках $M_{\alpha, \beta}$ равно утроенной средней квадратической погрешности измерения фона под этими пиками, составляет $6 \cdot 10^{-8}$ г/см². Увеличение активности источников до 450 мКи даст возможность уменьшить порог чувствительности в три раза. Основной вклад в фоновое излучение вносят тормозное излучение вторичных электронов, выбиваемых α -частицами из оболочек атомов мишени, и комптоновское рассеяние γ -излучения продуктов распада ²¹⁰Po. В предположении, что распределение рассеянного γ -излучения в интервале энергии 3–6 кэВ не зависит от энергии, вклад тормозного излучения вторичных электронов равен, по нашим оценкам, 60%. Фон тормозного излучения можно уменьшить за счет выбора для подложки мишени более тонкого материала.

Наличие в воде примесей некоторых элементов ухудшает чувствительность и точность анализа из-за затенения пиков характеристического излучения этих элементов и урана. Было исследовано влияние таких содержащих мешающего элемента — калия, при которых отношение интенсивности пиков КК и УМ меньше 5. Спектр рентгеновского излучения одного из образцов показан на рис. 5.

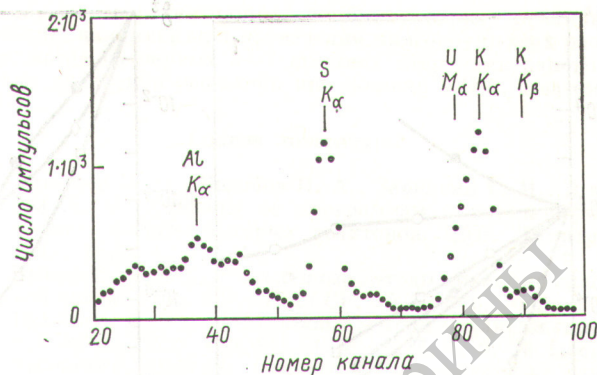


Рис. 5. Спектр рентгеновского излучения мишени, содержащей 6 мкг урана и 2 мкг калия (Пик AlK возникает из-за рассеяния характеристического излучения герметизирующей пленки источника)

Разность энергии между линиями UM_{β} и KK_{α} составляет 24 эВ, и разделить пики урана и калия путем обработки спектров можно только в том случае, если задана относительная интенсивность линий M-серии урана. Концентрацию урана в воде, содержащей примеси калия, определяя методом внутреннего стандарта по формуле (2) с $k = 8,75$ (см. таблицу). Средняя относительная погрешность измерений не превышает 30%.

Список литературы

1. Larsen R., Karttunen T. «Adv. in X-ray Analysis», 1975, v. 18, p. 62.
2. Hight R., Foster C. Ibid., p. 333.
3. Campbell J. e.a. «Anal. Chem.», 1975, v. 47, p. 1542.
4. Ishii K. e.a. «Phys. Rev.», 1975, v. A11, p. 119.
5. Basbas G. e.a. Ibid., 1973, v. A7, p. 983.
6. Garcia J. e.a. «Rev. Mod. Phys.», 1973, v. 45, p. 111.
7. Bambynek W. e.a. Ibid., 1972, v. 44, p. 716.
8. Ishii K. e.a. «Nucl. Instrum. Methods», 1975, v. 126, p. 75.

Поступило в Редакцию 07.08.78

УДК 539.125.52:621.039.51.12

Сравнение эффективности методов неполной факторизации и переменных направлений при решении одногруппового двумерного уравнения реактора

АЛЕКСЕЕВ П. Н., БУЛЕЕВ Н. И., ЗАРИЦКИЙ С. М., СТУКАЛОВ В. А., УСАЧЕВ Л. Н.

Для численных сеточных расчетов нейтронно-физических характеристик многомерных моделей реакторов требуется оптимизация метода решения систем линейных алгебраических уравнений вида

$$\hat{A}\varphi = f. \tag{1}$$

В результате численных исследований (см., например, [1]) было показано, что метод переменных направлений (МПН) является одним из наиболее эффективных итерационных методов решения уравнения (1) с симметричной матрицей \hat{A} . Поэтому представляется целесообразным сравнить с ним метод неполной факторизации (МНФ), который в последнее время быстро развивается.

Идея МНФ [2, 3] заключается в следующем. Исходное уравнение (1) представляется в виде

$$(\hat{A} + \hat{B})\varphi = f + \hat{B}\varphi. \tag{2}$$

Матрица \hat{B} выбирается таким образом, чтобы $(\hat{A} + \hat{B})$ могла быть представлена произведением

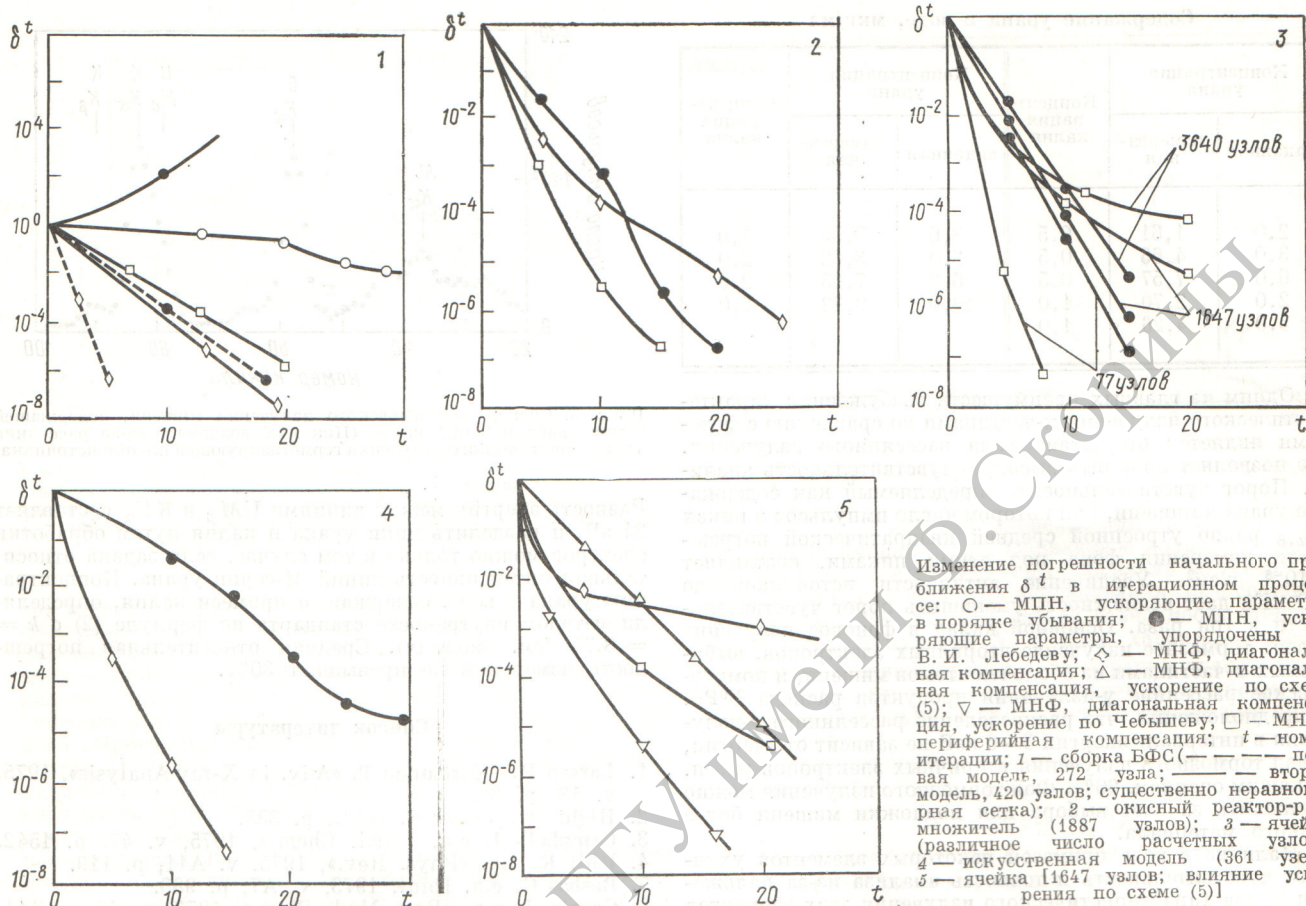
$$(\hat{A} + \hat{B}) = \hat{K}\hat{S}_1\hat{S}_2, \tag{3}$$

где \hat{S}_1 и \hat{S}_2 — матрицы более простой структуры, чем \hat{A} , с единичными элементами на главной диагонали; \hat{K} — диагональная матрица. Тогда уравнение (2) можно заменить системой уравнений

$$\hat{S}_1 z = \hat{K}^{-1} [f + \hat{B}\varphi]; \tag{4}$$

$$\hat{S}_2 \varphi = z,$$

которая решается методом последовательных приближений.



Произвольные форма рассматриваемой двумерной (или трехмерной) области и граничные условия для искомой функции не вносят никаких затруднений при использовании системы типа (4). Необходимо рассматривать различные аппроксимации граничных условий как самостоятельные уравнения, равноправные с уравнениями типа (1) для внутренних узлов области. В этом смысле МНФ обладает преимуществом по сравнению с различными вариантами МПН, так как использование последних становится затруднительным, если граница рассматриваемой области не параллельна линиям сетки.

Для реакторных задач представление (3) возможно при $\hat{B} = 0$, и если $\hat{S}_1 = \hat{S}_2^T$ (разложение по методу Холецкого [4]), то приходим к прямому обращению матрицы \hat{A} . Однако для прямых методов требуются большие ресурсы памяти ЭВМ, и при решении практических задач итерационные методы зачастую оказываются предпочтительнее. В МНФ матрица \hat{B} может быть представлена в виде $\hat{B} = \hat{D} - \hat{H}$ и ее норму можно минимизировать выбором матриц \hat{S}_1 и \hat{S}_2 , который однозначно определяет матрицу \hat{D} , или выбором матрицы \hat{H} . Если \hat{H} — диагональная матрица, то имеет место так называемая диагональная компенсация, если \hat{H} отлична от диагональной — периферийная.

В работе [5] предложен способ ускорения двухпроходных методов, аналогичных (4), путем формального применения метода экстраполяции к каждому уравнению по схеме:

$$z^{t+1} = \omega_z [\hat{S}_1^{-1} \hat{K}^{-1} (f + \hat{B}\varphi^t)] - (\omega_z - 1) z^t; \quad (5)$$

$$\varphi^{t+1} = \omega_\varphi [\hat{S}_2^{-1} z^{(t+1)}] - (\omega_\varphi - 1) \varphi^t,$$

где t — номер итерации; ω_z и ω_φ — ускоряющие параметры, рассчитываемые по эмпирической формуле $\omega_z = \omega_\varphi = 1,19/(1,19 - 0,19\rho)$; ρ — спектральный радиус итерационной матрицы схемы (5) при $\omega_z = \omega_\varphi = 1$.

Эффективность МПН и различных модификаций МНФ сравнивается на следующих моделях, подробно описанных в работе [1]: 1) на одной из критическихборок БФС; 2) на той же сборке БФС, в центре которой выделена зона со значительно более мелким шагом конечно-разностной сетки; 3) модели быстрого реактора с окисным топливом мощностью 1000 МВт; 4) модели ячейки в (x, y) -геометрии с сильной связью между пространственными переменными; 5) на искусственной модели, которую описывает оператор с далеко отстоящими друг от друга спектральными границами: $\lambda_{\max}/\lambda_{\min} \sim 10^6$. Модели 1, 2, 3 и 5 рассчитывались в (r, z) -геометрии. Методика численного сравнения эффективности итерационных методов при решении одногрупповых задач описана в работе [1].

Некоторые результаты сравнений приведены на графиках, на которых показано изменение погрешности $\delta^t = \max_{i,j} |\delta_{i,j}^t|$, где (i, j) — номер узла конечно-разностной сетки (см. рисунок).

Анализ результатов исследований приводит к следующим выводам: 1) при малом числе расчетных узлов (примерно 300) МНФ всегда эффективнее МПН; 2) при граничных условиях второго рода и числе расчетных узлов > 1000 скорость сходимости МНФ сильно замедляется

с ростом числа итераций; 3) для всех рассмотренных случаев МНФ оказался эффективнее МПН на первых 5—10 итерациях; 4) МНФ менее чувствителен к спектральным свойствам оператора A , чем МПН; 5) применение схемы (5) дает увеличение асимптотической скорости сходимости МНФ с диагональной компенсацией. Отметим, правда, что матрица \hat{D} в МНФ с диагональной компенсацией отличалась от таковой в МНФ с периферийной компенсацией.

Из анализа результатов видны пути дальнейшего усовершенствования МНФ: оптимизация выбора вида матриц \hat{S}_1 , \hat{S}_2 и \hat{H} и введение различных методов ускорения. Например, скорость сходимости в начале итерационного процесса и на асимптотике значительно увеличивается в случае применения, по предложению В. И. Лебедева, в МНФ с диагональной компенсацией ускорения (по Чебышеву) с перестановкой ускоряющих параметров; при расчете модели 4 — по такой схеме число итераций, необходимое для уменьшения погрешности начального приближения в 10^3 раз, сокращается в 2—3 раза по сравнению с МНФ с периферийной компенсацией. Может

оказаться перспективным комбинирование различных методов, например при проведении многогрупповых расчетов, когда на первых 5—7 внешних итерациях одnogрупповые уравнения решаются при помощи МНФ, а затем — МПН.

Список литературы

1. Алексеев П. Н., Болобов П. А., Зарицкий С. М., Шишков Л. К. Доклады по программам и методам физического расчета быстрых реакторов. СЭВ, Дмитровград, 1975, с. 15.
2. Булеев Н. И. В кн.: Численные методы механики сплошной среды. Изд. СО АН СССР, 1975, т. 6, № 3, с. 18.
3. Булеев Н. И. В кн.: Численные методы механики сплошной среды. Изд. СО АН СССР, 1978, т. 9, № 1, с. 5.
4. Уилкинсон, Райнш. Справочник алгоритмов на языке АЛГОЛ. Линейная алгебра. М., «Машиностроение», 1976, с. 20.
5. Woznicki Z. In: Reactortagung. Dusseldorf, Bonn, 1976, p. 83.

Поступило в Редакцию 16.08.78

УДК 621.039.512.2

Экспериментальное исследование влияния свинцовой и висмутовой зон размножения на нейтронные параметры модели жидкосолевого blankets термоядерного реактора

НОВИКОВ В. М., ШИХОВ С. Б., РОМОДАНОВ В. Л., ЗАГРЯДСКИЙ В. А., ЧУВИЛИН Д. Ю.

Основное назначение blanketных зон термоядерных реакторов (ТЯР) состоит в утилизации энергии термоядерных нейтронов, а также в паротке трития для «чистых» ТЯР или трития и делящихся нуклидов для гибридных и симбиозных схем ТЯР. Выбор теплоносителя и конструкционных материалов blankets ТЯР определяет их нейтронно-физические параметры. Одним из перспективных рабочих тел blankets считаются расплавы фтористых солей лития, бериллия и тяжелых элементов. Такие жидкосольевые blankets рассматриваются как для «чистых» [1], так и для гибридных ТЯР [2, 3].

Однако для жидкосольевых blankets вклад реакции ${}^7\text{Li}(n, n')\text{T}$ в общий баланс нейтронов мал. Это связано с существенным «смягчением» спектра нейтронов в результате неупругих рассеяний на ядрах фтора. Поэтому для чистого ТЯР с жидкосольевым blanketом коэффициент паротки трития на один термоядерный нейтрон K_T может лишь незначительно превышать единицу [2]. Чтобы компенсировать этот эффект, а также для дополнительной паротки в гибридных ТЯР делящихся нуклидов можно предусмотреть введение в blanket зоны размножения нейтронов. Такая зона размещается за вакуумной стенкой ТЯР, что дает возможность использовать деление ${}^{232}\text{Th}$ и ${}^{238}\text{U}$ в спектре термоядерных нейтронов или эффективное размножение нейтронов в реакции $(n, 2n)$ на таких элементах, как бериллий и свинец [4].

Настоящая работа является первой из серии работ, намеченных в обоснование программы исследований модулей жидкосольевого blankets ТЯР на установке Т-20 [5].

Экспериментальная модель жидкосольевого blankets (рис. 1) представляла собой сферу диаметром 400 мм, заполненную флайбом (эвтектическая смесь фтористых солей лития и бериллия — LiF , BeF_2 — в соотношении 50 на 50 мол. %). В эксперименте исследовалось влияние свинцовой и висмутовой зоны размножения на нейтронно-физические параметры модели blankets. Зоны размножения из свинца и висмута устанавливались во внутренней области модели. Источником нейтронов энергией 14 МэВ

служил нейтронный генератор, использующий D—T-реакцию. Энергия ускоряемых дейтронов 140 кэВ, ток на мишени 500 мкА. Выход нейтронов составлял $\sim 10^{10}$ нейтр./с. Мишень генератора — титанотригидридная, диаметр ее 45 мм.

Детекторами нейтронов служили малогабаритные импульсные камеры деления КНТ-2 и КНТ-5, содержащие ${}^{232}\text{Th}$ и ${}^{235}\text{U}$ соответственно. Калибровку мощности источника нейтронов проводили по методу счета сопутствующих α -частиц, что позволило сравнить результаты экспериментов в гомогенном шаре и в шаре с зонами размножения.

Методика исследования модели blankets заключалась в измерении скоростей деления ${}^{232}\text{Th}$ и ${}^{235}\text{U}$, приведенных

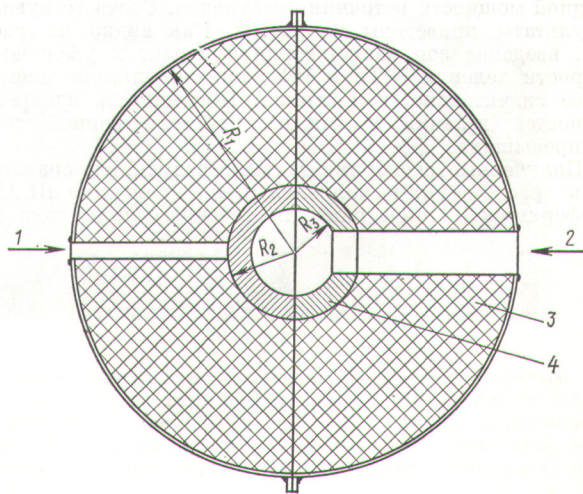


Рис. 1. Конструкция модели жидкосольевого blankets ТЯР: 1 — экспериментальный канал; 2 — канал источника; 3 — флайб; 4 — вставка из свинца или висмута; R_1 , R_2 , R_3 — 200, 60 и 37 мм соответственно