

УДК 621.039.512.45

# Сравнение четырех итерационных методов решения односторонних конечно-разностных диффузионных уравнений для двумерных моделей быстрых реакторов

АЛЕКСЕЕВ П. Н., БОЛОБОВ П. А., ЗАРИЦКИЙ С. М., КОЩЕЕВ В. Н., ПИНЕГИН А. А., ШИШКОВ Л. К.

Система многогрупповых диффузионных уравнений, описывающих распределение плотности потока нейтронов в двумерной модели реактора методом итераций источника деления, сводится к уравнениям типа

$$-\nabla D \nabla \varphi + \Sigma \varphi = q \quad (1)$$

с краевым условием

$$\partial \varphi / \partial n + \alpha \varphi / 2D = 0 \quad (2)$$

на границе реактора. Методом конечных разностей уравнение (1) с граничным условием (2) приводится к системе алгебраических уравнений

$$(\hat{L} + \hat{\Sigma}) \varphi = q, \quad (3)$$

решением которой являются значения искомого функции  $\varphi$  в узлах сетки. Структура матрицы  $(\hat{L} + \hat{\Sigma})$  зависит от вида ячейки конечно-разностной сетки и способа аппроксимации производных. Если для конечно-разностной аппроксимации уравнения (1) используется пятиточечный шаблон, то в результате получается симметричная, положительно определенная, пятидиагональная (ленточная) матрица. Система линейных уравнений (3) может быть решена различными итерационными методами. При создании программ для сеточного расчета многомерных моделей реакторов желательно выбрать оптимальный метод. Необходимость тщательного анализа эффективности диктуется высокими затратами машинного времени при использовании сеточных методов.

В работе сравниваются методы последовательной точечной верхней релаксации (МВР) [1]; полиномов Чебышева (МПЧ) [2]; сопряженных градиентов (МСГ) [3] и метод переменных направлений (МПН) [4] (наиболее эффективная схема с минимальным числом арифметических операций на один узел сетки и с оптимальной перестановкой ускоряющих параметров [5]).

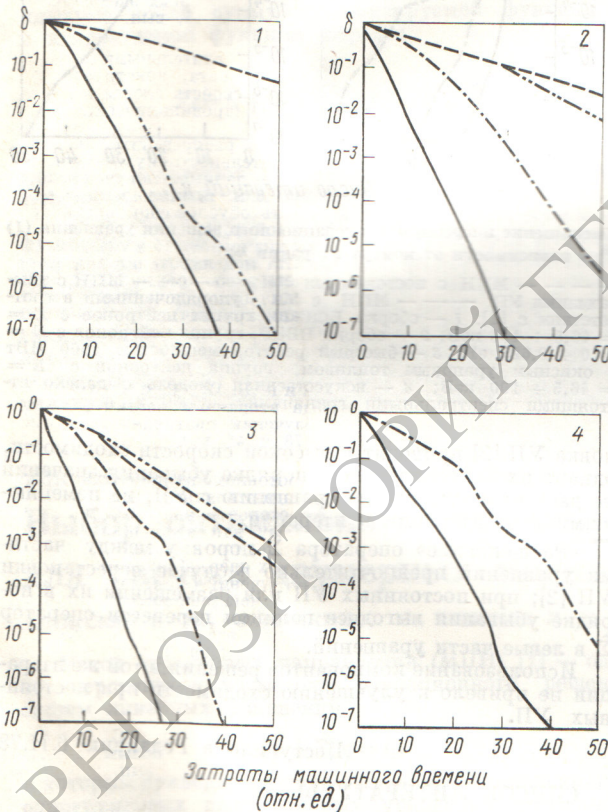
При сравнении методов по скорости сходимости необходимо учитывать число арифметических операций, приходящихся на один узел конечно-разностной сетки. Эта характеристика в расчете на одну итерацию представлена ниже:

Метод	Операции сложения и вычитания	Операции умножения и деления
МВР	5	5
МПЧ	2,5	3
МСГ	9	10
МПН	11	12

Методы по скорости сходимости сравниваются на примере расчета распределений плотности потока нейтронов различных энергетических групп в трех цилиндрических моделях быстрых реакторов ( $r-z$ -геометрия): одной из критических сборок большого физического стэнда (БФС), плутониевого реактора-размножителя с карбидным топливом мощностью 1000 МВт (упрощенная модель), энергетического реактора с окисным урановым топливом такой же мощности (натурная модель). Подробное описание этих моделей дано в работе [6].

Зависимость погрешности решения задачи (3) от номера итерации  $k$  исследовалась при  $q = 0$ . В этом случае точное решение  $\varphi = 0$  и искомая погрешность  $\delta^k = \max_{ij} (\varphi_{ij}^k)$ , где  $ij$  — номер узла конечно-разностной сетки. В качестве начального приближения использовался вектор  $\varphi$ , компоненты которого равны 1.

Некоторые результаты расчетов представлены на рисунке, где показано уменьшение погрешности  $\delta^k$ , достигаемое при одних и тех же затратах машинного времени (с учетом числа операций на один узел находился коэффициент, на который умножалось фактиче-



Уменьшение погрешности итерационного решения уравнения (3) в зависимости от затрат машинного времени

— — — — МВР; - - - - МПЧ; - · - · - МСГ; · · · · МПН; 1 — сборка БФС-26, группа нейтронов с  $E = 46,5 \div 100$  кэВ; 2 — плутониевый реактор-размножитель с карбидным топливом, группа нейтронов с  $E = 67 \div 300$  кэВ; 3 — тот же реактор, группа нейтронов с  $E = 0 \div 9,1$  кэВ; 4 — реактор с окисным урановым топливом, группа нейтронов с  $E = 46,5 \div 100$  кэВ



ское число итераций, затраченных в каждом итерационном методе). Для МВР этот коэффициент принимался равным 1.

Анализ полученных результатов показывает, что во всей области уменьшения погрешности наиболее эффективным при решении рассмотренных задач является метод переменных направлений в модификации, реализованной в программе [7] (см. рисунок).

Поступило в Редакцию 6.III.78

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Young D. «Trans. Amer. Math. Soc.», 1954, v. 76, p. 92.

2. Golub G., Varga R. «Numerische Math.», 1961, v. 3, N 2—3, p. 147.
3. Фаддеев Д. К., Фаддеева В. Н. Вычислительные методы линейной алгебры. М., Физматгиз, 1960.
4. Самарский А. А. Введение в теорию конечно-разностных схем. М., «Наука», 1971.
5. Лебедев В. И. «Журн. вычисл. матем. и матем. физ.», 1977, т. 17, № 2, с. 349.
6. Алексеев П. Н. и др. В кн.: Сборник докладов по программам и методам физического расчета быстрых реакторов. Под ред. М. Н. Зизина. Димитровград, 1976, с. 15.
7. Алексеев П. Н., Зарицкий С. М., Шипцов Л. К. Ядерно-физические исследования в СССР. М., Атомиздат, 1977, вып. 23, с. 30.

## Рефераты статей, опубликованных в настоящем выпуске

УДК 621.039.562

Будников В. И., Косолапов С. В., Крамеров А. Я., Сабаев Е. Ф. Устойчивость радиально-азимутального энергораспределения в кипящих канальных реакторах.—«Атомная энергия», 1978, т. 45, вып. 5, с. 331.

Предложена методика расчета устойчивости радиально-азимутального энергораспределения в кипящих канальных реакторах. Получено характеристическое уравнение. В плоскости коэффициентов реактивности выделены области устойчивости. Проанализировано влияние изменения коэффициентов реактивности на запас устойчивости, характер и период возможной неустойчивости пространственного распределения мощности реактора (рис. 5, список литературы 15 наименований).

УДК 621.039.58/59

Агеенков А. Т., Валуйев Е. М. Исследование процесса удаления трития из облученной двуокиси урана при окислительной обработке в воздухе.—«Атомная энергия», 1978, т. 45, вып. 5, с. 335.

В настоящей работе решалась задача оптимизации процесса окислительной рекристаллизации облученной двуокиси урана в целях удаления максимально возможного количества продукта деления — трития. Исследовалась облученная двуокись урана с выгоранием 25600 МВт·сут/т U.

Изучен процесс окисления в атмосфере влажного воздуха в зависимости от температуры и времени обработки. Найдены оптимальные параметры удаления трития из отработавшего топлива: за 12 ч при 650—700 °С количество удаленного трития составляет 99,96% общего содержания в облученной двуокиси урана (рис. 1, табл. 2, список литературы 6 наименований).

УДК 621.039.534.6

Афанасьев В. А., Александров К. А., Кебадзе В. В., Грязев В. М., Голушко В. В., Краснояров Н. В., Митенков Ф. М., Меркулов В. И., Пахомов В. В., Карасев В. Н., Земляни А. В. (СССР), Фуге Р., Придель Э., Ульман Г., Кэтцмер Д. (ГДР). Эксперименты по испарению натрия на реакторе BOR-60.—«Атомная энергия», 1978, т. 45, вып. 5, с. 338.

Кипение натрия в специальной сборке активной зоны реактора BOR-60 достигается за счет нагрева вольфрамовых стержней от  $\gamma$ -излучения. Показана возможность обнаружения вскипания по акустическим и нейтронным шумам, а также некоторые результаты спектрального и корреляционного анализа. В работе указывается на необходимость специального формирования сигналов для повышения надежности обнаружения (рис. 6, список литературы 3 наименования).

УДК 66.061.023.3:621.039.327

Захаров Е. И., Карпачева С. М. Разработка методик расчета и моделирования пульсационных экстракционных колонн.—«Атомная энергия», 1978, т. 45, вып. 5, с. 343.

В пульсационных колоннах с распределительными насадками исследовано влияние диаметра аппарата, конструктивных элементов насадки, физико-химических свойств систем и интенсивности перемешивания на основные гидродинамические показатели.

Анализ результатов показал, что распределительная насадка позволяет повысить производительность пульсационных колонн в 1,5—3 раза, использовать данные, полученные на модели, в аппаратах диаметром до 1,5 м. Возможное снижение эффективности их работы может быть обусловлено только продольным перемешиванием в сплошной фазе.

Экспериментом на экстракторе диаметром 1,5 м подтверждено расчетное значение коэффициента моделирования эффективности. Предложена методика расчета экспериментальных аппаратов по заданной величине дробления дисперсной фазы (рис. 11, табл. 3, список литературы 24 наименования).

УДК 539.106—539.107.37

Ломанов М. Ф., Резник Б. И., Шимчук Г. Г., Яковлев Р. М. Изучение вклада вторичных частиц в поглощенную дозу при локальном облучении протонами с энергией 200 МэВ.—«Атомная энергия», 1978, т. 45, вып. 5, с. 350.

На медико-биологическом протонном пучке синхротрона ИТФ проведено исследование вклада вторичных частиц в поглощенную дозу на узком пучке протонов с энергией 200 МэВ. Рассмотрен вопрос о вкладе в дозу как вторичных частиц, рожденных во внутриядерном распаде, так и частиц, образованных в процессе распада возбужденных ядер. Приводятся результаты измерения доз вторичных излучений с помощью ядерных фотоумножителей. Сделан вывод о линейной зависимости величины поправки в поглощенную дозу от размеров пучка. При облучении гипотеза узким пучком диаметром 6 мм эта поправка составляет 5,5% дозы первичных протонов (рис. 2, табл. 2, список литературы 11 наименований).

УДК 621.384.647

Бонч-Осмоловский А. Г., Доля С. Н. Сильноточный ускоритель ионизации средних энергий с полым электронным пучком.—«Атомная энергия», 1978, т. 45, вып. 5, с. 354.

Модулированный по плотности полый электронный пучок приобретает слаборелятивистскую вращательную энергию в резонансодвижном магнитном поле (наспе). Образованный при этом дуг ступцов с максимальной плотностью  $\sim 10^{12}$  электр./см<sup>2</sup> захватывает ионы и ускоряется в специальной сенции с мультиспиальным или винтовым магнитным полем. Обсуждаются вопросы формирования, фокусировки и устойчивости такого пучка. Показано, что при относительно малом количестве частиц потоки ускоряемых ионов могут достигать  $10^{12}$ — $10^{14}$  и/с при темпе ускорения 10 МэВ/м и выше (рис. 1, список литературы 16 наименований).