

Девкина Е. В.

**Особенности проведения расчётов методом Монте-Карло
двумерной тестовой модели защиты ТУК
для отработавшего ядерного топлива**

Девкина Е. В.

Особенности проведения расчётов методом Монте-Карло двумерной тестовой модели защиты ТУК для отработавшего ядерного топлива

Препринт ФЭИ – 3283, Обнинск, 2018, 20 с.

Настоящий препринт посвящён сравнению методов расчёта защиты транспортных упаковочных контейнеров (ТУК). В препринте представлены результаты расчётов двумерной тестовой модели защиты ТУК для отработавшего ядерного топлива с источником гамма-квантов от продуктов деления. Расчёты выполнены по методу Монте-Карло с применением методов понижения дисперсии: метода вынужденных столкновений, с расщеплением геометрии и русской рулеткой, с весовыми окнами, полученными MAGIC (Method of Automatic Generation of Importances by Calculation)-методом. Проведено сравнение результатов прямого расчёта и расчётов, полученных с применением методов понижения дисперсии.

Представлены значения мощности доз гамма-квантов.

This work is devoted to comparison of numerical techniques for shielding calculation of transport containers. Results for the two-dimensional benchmark model with gamma source of fission products are presented. Calculation performed with the Monte Carlo method with variance reduction techniques: with forced collisions, with geometry splitting Russian Roulette, with the MAGIC (Method of Automatic Generation of Importances by Calculation) method, are compared with direct calculation,

Gamma dose rates are presented too.

Ключевые слова: двумерная тестовая модель защиты ТУК, метод Монте-Карло, метод вынужденных столкновений, метод задания различной ценности в ячейках, весовые окна, MAGIC-метод.

Введение

Рассчитываемый бенчмарк представляет собой двухмерную тестовую модель защиты ТУК (транспортных упаковочных контейнеров) для отработавшего ядерного топлива с источником гамма-квантов от продуктов деления. Этот вычислительный бенчмарк был сформулирован в работе [1]. Цель настоящей работы исследовать особенности использования метода Монте-Карло для расчёта защиты ТУК.

В ядерной физике для расчёта распределения частиц используются детерминистический подход и стохастический подход (метод Монте-Карло). Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Детерминистические методы позволяют получить подробное решение для всей расчётной системы. Однако они содержат погрешности, связанные с дискретизацией независимых пространственных, энергетических и угловых переменных в уравнении переноса, из-за этого могут получаться решения, не имеющие физического смысла, например, отрицательные значения потоков частиц. Это происходит в основном при расчёте защиты. Чтобы получить достоверные результаты для этого класса задач, приходится задавать подробное пространственно-энергетическое разбиение, и ресурсов ЭВМ может не хватить для расчёта. Задача будет либо медленно сходиться, либо совсем не будет считаться.

Метод Монте-Карло позволяет детально описывать геометрию, энергетическое и угловое распределение частиц, используя поточечное описание сечений взаимодействия и индикатриссы рассеяния. Этот метод считается более точным для решения сложных задач переноса частиц. В методе Монте-Карло моделируется поведение отдельных частиц и по этим данным делается вывод о поведении частиц в среднем. Для достоверных результатов необходимо определённое количество частиц. При расчёте защитных задач в пространство за защитой попадает небольшое количество частиц и этого количества недостаточно для получения результатов с допустимой погрешностью. Это так называемые задачи глубокого проникновения (deep penetration) частиц. Такой тип задач либо очень медленно сходится и требует больших вычислительных затрат, либо значения погрешности получаются намного больше допустимых значений и результаты расчётов неправильные. Для расчёта такого класса задач методом Монте-Карло применяются методы понижения дисперсии, которые искусственно увеличивают количество частиц в областях за защитой, чтобы достичь нужной выборки [2].

В настоящее время разработано много способов понижения дисперсии. Некоторые методы дисперсии имеют общее применение и их сложно использовать неправильно. Другие более специфичны и подходят для определённого типа задач. Неправильное применение таких методов может привести либо к ложным результатам с хорошей статистикой, либо не понизит дисперсию до допустимых значений. Методы понижения дисперсии, которые используются корректно, помогают проводить эффективно расчёты.

1. Методы понижения дисперсии, использованные в расчётах тестовой модели

В приведенных ниже расчётах использовались следующие методы понижения дисперсии (МПД):

- моделирование по ценности,
- методы контроля популяций частиц.

В методе моделирование по ценности реальные физические процессы искажаются таким образом, чтобы события, которые представляют интерес для расчёта, происходили более часто, чем это имеет место в действительности. Этот процесс регулируется с помощью функции ценности, а искажение реальных процессов затем компенсируется соответствующим выбором оценивающей случайной величины. Метод вынужденных столкновений, который применялся для расчёта бенчмарка, относится к этому способу понижения дисперсии [3].

Метод вынужденных столкновений

Метод вынужденного столкновения – схема уменьшения дисперсии, которая увеличивает выборку столкновений в определённой ячейке. Метод вынужденных столкновений делит частицы на столкнувшиеся и не столкнувшиеся. Столкнувшуюся часть частиц вынуждают сталкиваться внутри текущей ячейки. Не столкнувшаяся часть частиц существует внутри текущей ячейки без столкновений и сохраняется в банке до тех пор, пока они не пересекут границу ячейки. Вес не столкнувшихся частиц умножается на вероятность существования частиц внутри ячейки без столкновений и равен:

$$W = W_0(1 - e^{-\Sigma_t d}),$$

где W_0 – вес текущей частицы перед вынужденным столкновением; d – расстояние до поверхности ячейки в направлении частиц; Σ_t – полное макроскопическое сечение материала ячейки.

Столкнувшаяся часть частиц имеет вес $W = W_0(1 - e^{-\Sigma_t d})$, то есть вес столкнувшейся частицы умножается на вероятность соударения в ячейке.

Методы контроля популяций частиц

Методы контроля популяций частиц используют Русскую рулетку и расщепление частицы. При решении задач переноса в фазовом пространстве с точки зрения вклада в функционал можно выделить ценные и малоценные области. В малоценных областях желательно ограничивать количество цепочек случайных блужданий, так как их вклад в оценку мал, и они могут сильно увеличивать дисперсию расчёта. В ценных областях, дающих основной вклад в оценку функционалов, желательно увеличивать число испытаний.

Эффективным средством регулирования количества столкновений в «плохих» и «хороших» областях является метод рулетки и расщепления. Для частиц,

которые влетают в малоценные области, применяется рулетка. Смысл рулетки в том, что разыгрывается гибель частицы с вероятностью p . Розыгрыш гибели производится или при пересечении границы, когда частица переходит из «хорошей» области в «плохую», или при столкновении в «плохой» области. Соответственно различают вариант рулетки и расщепления, применяемый при пересечениях частицами определённых поверхностей, и вариант рулетки и расщепления, применяемый при столкновениях. Чтобы при этом не произошло смещения результата расчёта, вес уцелевших частиц увеличивается в $1/(1-p)$ раз. Расщепление представляет собой противоположную процедуру, которая применяется в «хороших» областях и заключается в расщеплении частицы на n одинаковых и независимых друг от друга частиц. Каждая из этих частиц имеет вес равный $1/n$ веса материнской частицы [4].

Из популяционных методов в расчётах использовались метод рулетки и расщепления и весовые окна.

Различные ценности в ячейках

В программе MCNP метод расщепления геометрии и Русской рулетки реализован в виде задания различной ценности частиц в ячейках. Пользователем в каждой геометрической ячейке задаётся ценность I , с помощью карты `imp`. Значения ценностей ячеек увеличиваются по направлению движения частиц. Число I должно быть пропорционально расчётному значению тех частиц, которые есть в ячейке. Когда частицы с весом W вылетают из ячейки с ценностью I в ячейку с большей ценностью I' , частицы расщепляются на количество идентичных частиц низшего веса, согласно следующему способу. Если $I'/I=n$ целое число и n больше или равно 2, частицы расщепляются на n одинаковых частиц, каждая с весом W/n . Вес сохраняется в виде целого процесса расщепления. Если отношение I'/I не целое число, но больше единицы, расщепление делается вероятностным, так, чтобы ожидаемое число расщеплений было равно отношению вероятностей. Выражение $n=[I'/I]$, большее целое в I'/I , вероятность p определяется как $p=I'/I-n$. Тогда с вероятностью p , используется $n+1$ частица, и с вероятностью $1-p$ используется n частиц. Например, если I'/I равно 2,75, 75 % времени 1 частица расщепляется на 3 и 25 % времени 2 частицы расщепляются на 2. Перераспределённый вес для каждой частицы равен $W=I/I'$, который является ожидаемым весом, чтобы уменьшить до минимума дисперсию весов.

С другой стороны, если частица весом W вылетает из ячейки ценностью I в ячейку более низкой ценности I' , так, что $I'/I<1$, разыгрывается русская рулетка и частица исчезает с вероятностью $1-(I'/I)$ или следует дальше с вероятностью I'/I и весом $W=I/I'$.

Присвоенные значения ячеек могут иметь любое значение – они не ограничены целыми значениями. Желательно, чтобы в расположенных рядом геометрических ячейках не было большой разницы значений ценности, так как это даёт большую нагрузку в надёжной выборке. Лучше брать отношение значений ценностей

находящихся рядом ячеек маленьким и иметь ячейки с толщиной в направлении движения частиц менее чем две длины свободного пробега. MCNP печатает предупреждение, если ценности соседних ячеек отличаются больше, чем в 4 раза [3].

Весовые окна

Весовые окна – метод расщепления и Русской рулетки, имеющий пространственную и энергетическую зависимость. На геометрическую часть фазового пространства накладывается дополнительная сетка. Она может быть либо прямоугольной (X,Y,Z) , либо цилиндрической (R,θ,Z) . По энергии выделяется несколько энергетических групп. Для каждой пространственно-энергетической ячейки фазового пространства пользователь задаёт нижнюю весовую границу. Верхняя весовая граница W_U определяется умножением нижней весовой границы на константу. Эти весовые границы определяют окно допустимых весов частицы. Если вес частицы меньше нижней границы, разыгрывается Русская рулетка и частица либо продолжает движение с весом W_s внутри окна, либо частица исчезает. Если вес частицы выше весовой границы окна, она расщепляется так, что все расщепленные частицы находятся внутри весового окна.

Пользователь определяет W_L для каждой пространственно-энергетической ячейки в файле `wwinp`. W_S и W_U рассчитываются, используя две константы CS и CU (вводятся в `WWP` карту).

Весовые окна могут применяться к поверхностям, местам столкновений или к тому и другому.

$$\text{Ценность} = \frac{\text{Полное количество частиц (и их продуктов), влетающих в ячейку}}{\text{Полный вес веса, влетающего в ячейку}}.$$

Весовые окна определяются, как величины обратно пропорциональные ценности, затем они записываются в файл, который используется для дальнейших расчётов.

Генерация весовых окон

Файл весовых окон можно получить несколькими методами: вручную, задавая значения для каждой ячейке сетки, с помощью генератора весовых окон программы MCNP и используя автоматические методы генерации весовых окон. «Ручной метод» генерации весовых окон целесообразно применять при небольшом количестве ячеек. В этом бенчмарке используется 1080000 пространственно-энергетических ячеек, понятно, что для такого количества ячеек подобрать ручную значения ценности невозможно.

Генератор весовых окон программы MCNP использует результаты прямого расчёта распределения частиц. Полученное распределение частиц за защитой будет иметь большую погрешность и неверные значения. Весовые окна, полученные таким способом, некорректны и не будут эффективно понижать дисперсию. Выход

из ситуации – применение дополнительных автоматических методов генерации весовых окон.

Для генерации весовых окон применялся MAGIC (Method of Automatic Generation of Importances by Calculation) метод.

MAGIC-метод – итерационный метод автоматического генерирования весовых окон. Для получения весовых окон используются результаты расчётов прямой задачи по методу Монте-Карло (MCNP). Вначале проводится расчет по программе MCNP, в котором с помощью оценки fmesh находится распределение потоков частиц на всём фазовом пространстве. Далее, используя результаты расчётов, создают весовые окна. Для генерации весовых окон используется простейшая процедура реконструкции данных. В итерационном цикле нулевые значения в ячейках

сетки заменяются на средние арифметические $\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \Phi_i \right)$ либо средние геометри-

ческие $\left(\prod_{i=1}^n \Phi_i \right)^{1/n}$ по соседним ячейкам. Реконструкция по среднему арифметиче-

скому обычно дает более огрубленную картину, с завышением потока в восстановленных ячейках. В результате получается далекое от истинного, но достаточно гладкое распределение, пригодное для проведения дальнейших итераций. На втором шаге проводится расчёт с весовыми окнами, полученными на первом шаге, затем результаты расчётов используются для получения весовых окон, которые используются на следующем шаге. После 3–4 шагов получаются весовые окна, которые используются для получения оценок [5].

2. Применение методов понижения дисперсии для тестовой расчётной модели

В методах вынужденных столкновений и задания различной ценности в ячейках расчётчик выбирает ячейки и подбирает для них коэффициенты «вручную». Насколько он правильно это сделает, и насколько эти методы будут эффективно понижать дисперсию, зависит от его опыта и интуиции. Для методов вынужденных столкновений и задания различной ценности в ячейках рассчитывалось несколько вариантов. В настоящей работе приведены варианты с меньшей дисперсией. В методе весовых окон значения ценностей весовых окон подбираются программой автоматически. Размер весового окна и количество энергетических групп задает пользователь. Для расчётов весовых окон использовались несколько пространственно-энергетических сеток с различным разбиением по пространству. Наиболее эффективными оказались весовые окна с меньшим размером. Результаты расчётов с наиболее эффективными весовыми окнами приведены в пре-принте.

Метод вынужденных столкновений

На рисунке 1 изображена расчётная модель для метода вынужденных столкновений. Метод вынужденных столкновений применялся к ячейкам, содержащим материал, сильно ослабляющий гамма-излучение и к ячейке, в которой оценивались мощности доз. На рисунке 1 приведены коэффициенты для метода вынужденных столкновений.

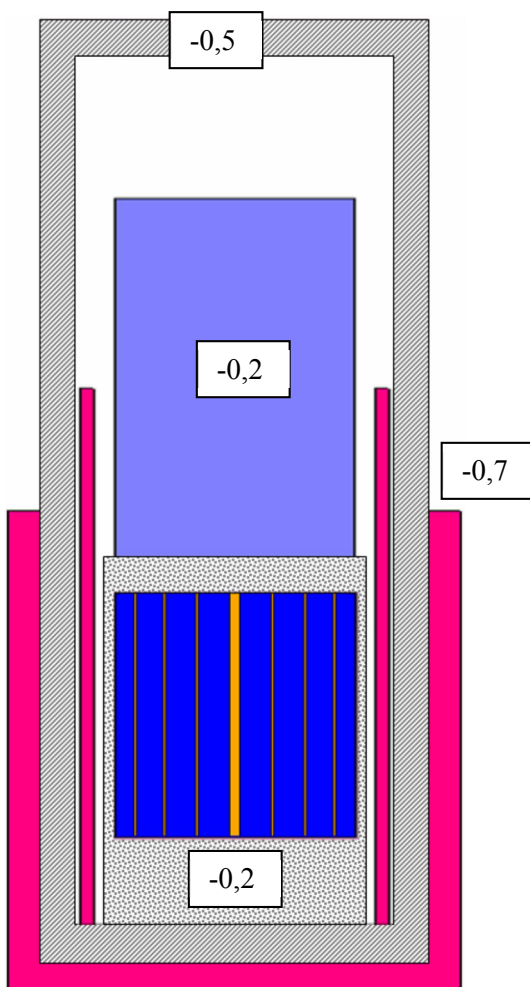


Рис. 1. Расчётная модель для метода вынужденных столкновений

На рисунке 2 изображена расчётная модель для задания различной ценности в ячейках. Ячейки с толстыми слоями защитного материала разбивались на более мелкие. Каждой ячейке присваивалось значение ценности. На рисунке 2 представлено разбиение ячеек и значения их ценностей.

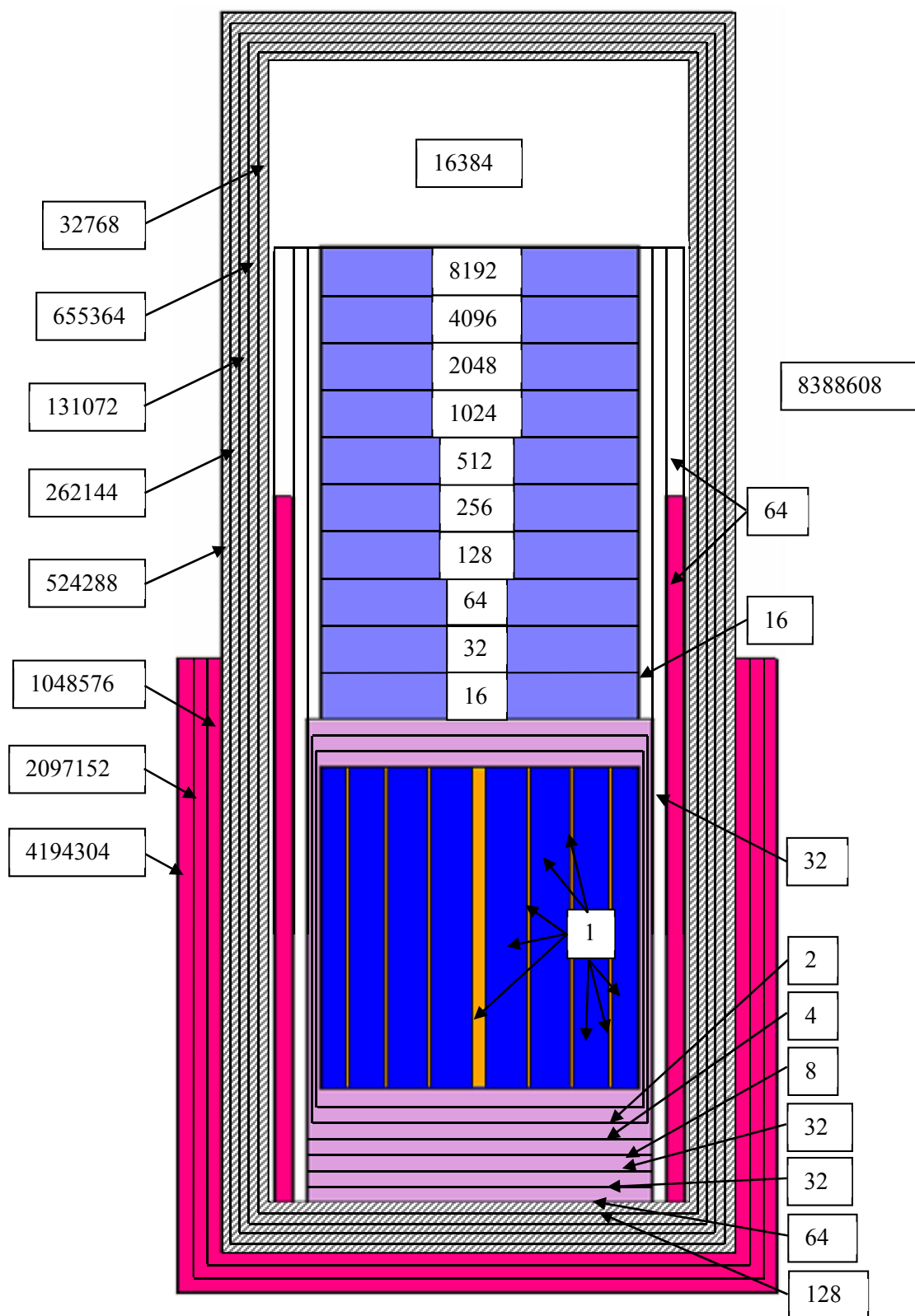


Рис. 2. Расчётная модель для метода задания различной ценности в ячейках

Применение метода весовых окон

Расчётная область разбивалась на прямоугольные ячейки размером $10 \times 10 \times 7$ см. По энергии выделялись три энергетические группы: $0 \div 0,02$, $0,02 \div 1,25$, $1,25 \div 11$ МэВ. В каждой пространственно-энергетической ячейке вычислялся поток гамма-квантов. Затем, используя полученное распределение частиц, создаются весовые окна.

Оценка качества проведённых расчётов

Одним из критериев качества выполненных расчётов служит величина относительной погрешности, которая должна быть меньше допустимого значения. Для большинства задач величина погрешности вычислений пропорциональна $1/\sqrt{N}$.

При использовании метода Монте-Карло для расчёта защитных задач возникают трудности. Задачи такого типа либо медленно сходятся, либо погрешность в них носит стохастический характер – задачи глубокого проникновения частиц. Для медленно сходящихся задач достаточно увеличить время счёта, чтобы получить результаты с удовлетворительной погрешностью. Для задач, в которых погрешность носит стохастический характер, увеличение числа историй не снизит погрешность до допустимых значений. Для такого класса задач нужно применять дополнительные математические методы понижения дисперсии.

В программе MCNP кроме рассчитываемого функционала и его относительной погрешности для каждой оценки выдаётся дополнительная информация. Она помогает понять, нужно ли применять дополнительные методы понижения дисперсии или достаточно запустить задачу на дополнительное время, и если применялись методы понижения дисперсии, оценить их эффективность.

Эта дополнительная информация: величины FOM, VOV, тангенс угла наклона $f(x)$ и также оценивается поведение этих величин, среднего и относительной погрешности от количества историй.

FOM (figure of merit) – показатель качества расчёта.

$FOM = 1/(R^2 T)$, где R – относительная погрешность, T – компьютерное время в минутах. Как было отмечено выше, для хорошо сходящихся задач R^2 обратно пропорционально N , а N прямо пропорционально T . Из этого следует, что для одного и того же расчёта при изменении количества историй FOM будет одинаковым. Резкое уменьшение FOM показывает, что пролёт редкой (случайной) частицы оказывает значительное воздействие на результат оценки и относительную погрешность.

Чем выше скорость сходимости задачи, тем больше значения FOM. Для одной и той же задачи при применении методов понижения дисперсии значения FOM могут отличаться на несколько порядков. Увеличение значения FOM показывает, что применение методов понижения дисперсии существенно повышает эффективность расчёта.

VOV (Variance Of Variance) – оценённая относительная погрешность R . VOV включает в себя третий и четвёртый моменты эмпирической функции плотности вероятности $f(x)$.

$$VOV = \sum (x_i - \bar{x})^4 / \left(\sum (x_i - \bar{x})^2 \right)^2 - 1 / N.$$

Тангенс угла наклона $f(x)$.

Для определения тангенса угла наклона эмпирической функции плотности вероятности используется Парето-аппроксимация. Общая функция Парето имеет вид $f(x)=a^{-1}(1+kx/a)^{-(1/k)-1}$. Методом максимального правдоподобия находятся значения a и k . Из аппроксимации Парето находится тангенс угла наклона SLOPE:

$$SLOPE \equiv (1/k)+1.$$

Поведение рассчитываемого функционала, R , FOM, VOV, SLOPE оценивается для второй половины задачи с помощью 10 статистических проверок. Результаты этих проверок выдаются в конце выходного файла. Ниже приводятся характеристики для прямого расчёта, при которых статистические проверки считаются пройденными:

Рассчитываемый функционал

1) С увеличением количества историй величина рассчитываемого функционала испытывает небольшие колебания.

R – относительная статистическая ошибка

2) величина относительной статистической ошибки R должна быть меньше 0,05 для точечного детектора и меньше 0,10 для остальных оценок.

3) с увеличением числа историй R монотонно убывает.

4) R имеет следующую зависимость от числа историй $1/\sqrt{N}$, где N число историй.

VOV – оценённая относительная погрешность R

5) величина VOV должна быть меньше 0,1 для всех типов оценок.

6) VOV монотонно уменьшается с увеличением числа историй.

7) величина VOV обратно пропорциональна числу историй.

FOM

8) значения FOM должны быть практически постоянными.

9) значения FOM могут иметь небольшие колебания с увеличением числа историй N .

SLOPE $f(x)$

10) тангенс угла наклона должен быть больше 3, так, чтобы существовал второй момент $\int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx$, когда SLOPE экстраполируется на бесконечное количество историй.

Если статистическая проверка удовлетворяет всем требованиям, то ей присваивается статус – прошла, если нет, MCNP печатает предупреждение.

Доверительный интервал считается надёжным, если пройдены все статистические проверки. Не полностью пройденные статистические проверки показывают, что доверительный интервал меньше действительного и его пределы нужно расширять [3].

Стратегия выполнения расчёта

Продолжительность расчёта задачи определяется пользователем. Продолжительность расчёта ограничивается либо количеством историй, либо временем. Применение методов понижения дисперсии может увеличить время расчёта одной истории, поэтому для таких расчётов, в которых применяются методы понижения дисперсии, лучше задавать ограничение по времени. После окончания расчёта оценивается статистическая погрешность и её зависимость от количества историй. В таблице 1 даны критерии, с помощью которых определяется продолжительность расчёта.

Таблица 1. Значения и характер поведения статистической погрешности в зависимости от числа историй

Значения и характер поведения статистической погрешности	Действия
Статистическая погрешность меньше допустимых значений	Расчёт не надо запускать на дополнительное время
Статистическая погрешность больше допустимых значений, монотонно убывает с увеличением числа историй	Следует запустить расчёт на дополнительное время
Статистическая погрешность больше допустимых значений, сначала монотонно убывает, а затем резко возрастает с увеличением числа историй	Для прямого расчёта нужно применять методы понижения дисперсии. Неэффективность применённого метода понижения дисперсии

На рисунке 3 приведены графики изменения статистической погрешности от числа историй для точки 2.

Из рисунка видно, что для метода различных ценностей в ячейках относительная статистическая погрешность уменьшается монотонно для второй половины задачи и достигает допустимых значений. Для метода вынужденных столкновений относительная статистическая погрешность сначала монотонно убывает, а затем резко возрастает с увеличением числа историй. Для этого метода дальнейшее увеличение времени расчёта не целесообразно. Применение этого метода для расчёта данного бенчмарка не эффективно.

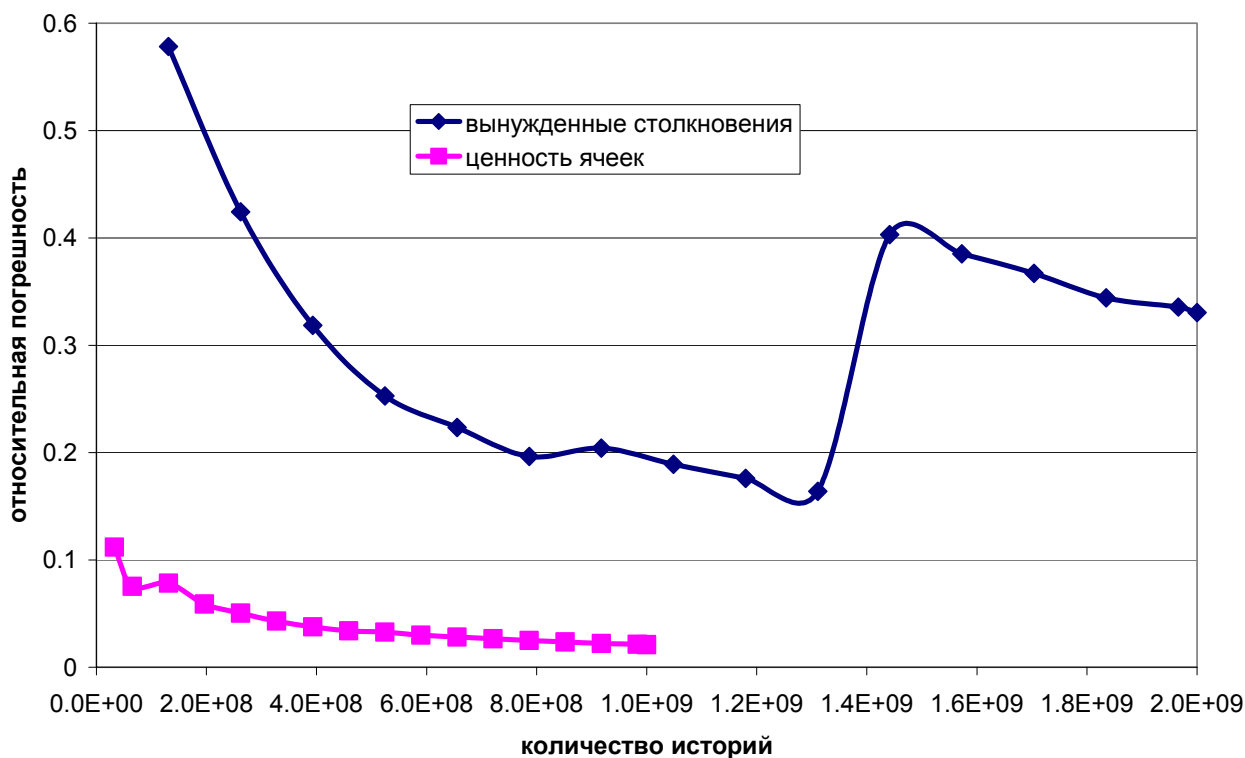


Рис. 3. Зависимость относительной статистической погрешности от числа историй

3. Результаты расчётов

Для расчёта бенчмарка использовалась программа MCNP. Программа MCNP аттестована для моделирования переноса нейтронов и фотонов при проведении проектных расчетов радиационной защиты и обосновании радиационной безопасности объектов использования атомной энергии, в том числе для расчета плотности потока нейтронов и поглощенной дозы фотонов для контейнеров с отработавшим ядерным топливом.

Рассчитываемым функционалом бенчмарка является мощность дозы от гамма-квантов. На рисунке 4 показана схема расчётной модели и расположение точек детектирования. В данной работе рассчитывалась мощность дозы гамма-излучения от продуктов деления. Мощность дозы рассчитывалась для источника интенсивностью 1 гамма-квант/с. Для её вычисления применялась точечная оценка f_5 . Для этой оценки достоверными считаются результаты с методической погрешностью менее 5 %, результаты с погрешностью от 5 до 10 % расцениваются как сомнительные, результаты с погрешностью более 10 % не принимаются во внимание [6]. В таблице 2 даны значения FOM. В таблице 3 приведены значения мощностей доз в мкЗв/ч и их относительная методическая погрешность.

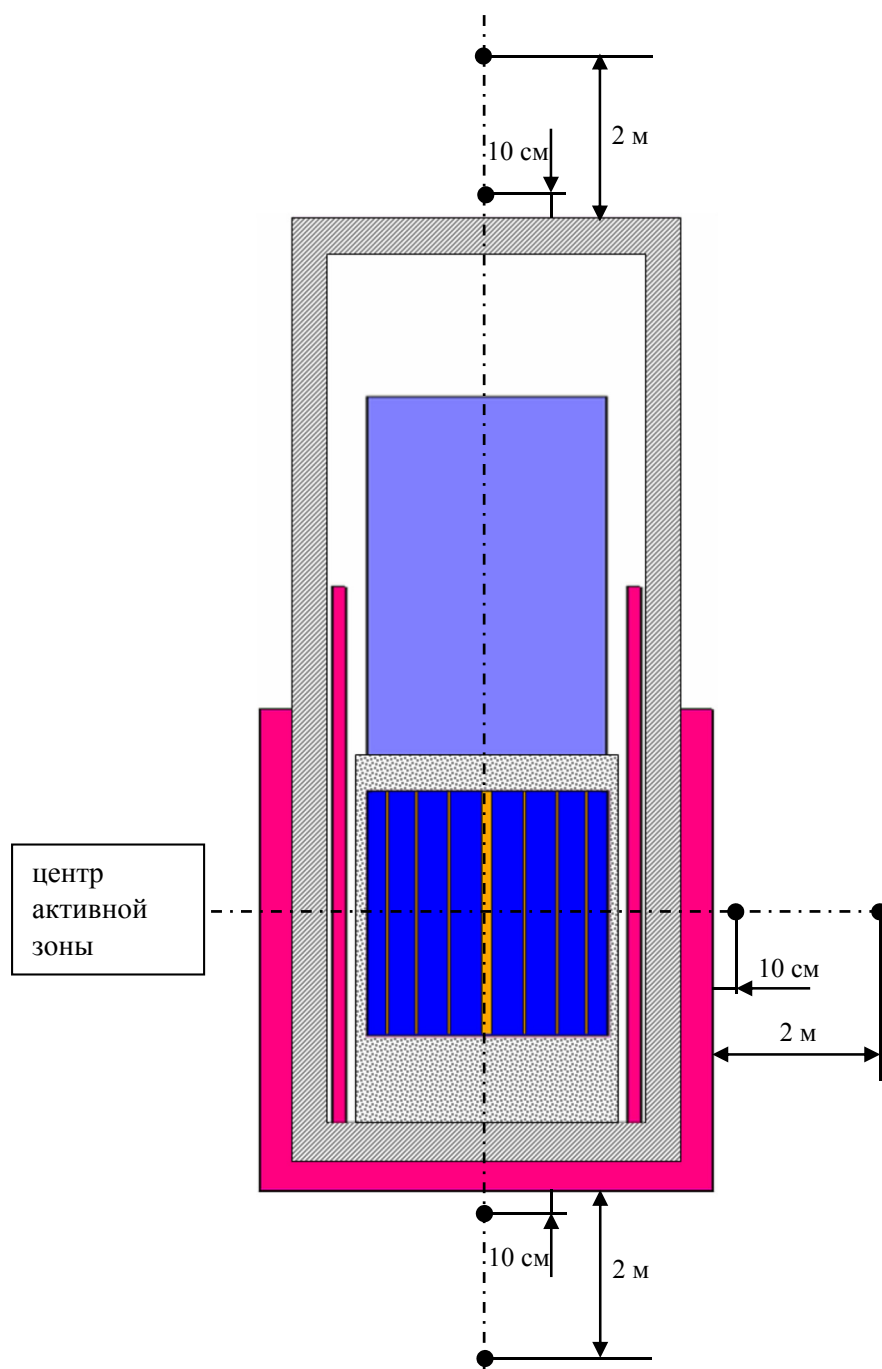


Рис. 4. Расположение точек детектирования

Таблица 2. Значения FOM

Номер точки детектирования	Прямой расчёт	Метод MAGIC (весовые окна)	Различная ценность в ячейках	Вынужденные столкновения
1	3,3E-06	1,0E-02	2,1E-03	4,50E-05
2	2,5E-05	1,4E-03	7,7E-04	6,50E-06
3	7,1E-06	8,4E-03	4,6E-03	2,20E-05
4	3,6E-06	1,1E-02	2,1E-03	8,90E-05
5	1,4E-04	6,8E-03	5,2E-03	1,00E-04
6	3,4E-06	2,0E-02	8,7E-03	4,10E-05

Значения FOM для прямого расчёта на 2–3 порядка, а для метода вынужденных столкновений на 1–2 порядка ниже метода весовых окон и различной ценности в ячейках. Это показывает, что проведение расчётов с применением методов весовых окон и различной ценности в ячейках эффективнее. Применение метода вынужденных столкновений не даёт существенного повышения эффективности расчёта.

Таблица 3. Мощность дозы в мкЗв/ч в точках детектирования

Номер точки детектирования	Прямой расчёт		Метод MAGIC (весовые окна)		Различная ценность в ячейках		Вынужденные столкновения	
	Мощность дозы	Δ	Мощность дозы	Δ	Мощность дозы	Δ	Мощность дозы	Δ
1	1,26E-17	0,710	4,58E-18	0,013	4,69E-18	0,019	2,01E-18	0,1388
2	2,79E-14	0,262	3,13E-14	0,034	3,37E-14	0,032	3,97E-14	0,1956
3	3,95E-23	0,487	7,22E-19	0,014	6,78E-19	0,013	3,70E-19	0,3635
4	2,19E-17	0,686	9,65E-18	0,012	9,83E-18	0,020	6,09E-18	0,0985
5	4,42E-15	0,111	3,84E-15	0,016	3,95E-15	0,012	3,88E-15	0,0928
6	2,92E-18	0,707	3,65E-18	0,009	3,56E-18	0,010	2,37E-18	0,1449

Из таблицы 3 видно, что величина относительной погрешности при прямом расчёте сильно превышает допустимые значения. Значения мощности доз в точках 1 и 4 на порядок превышают, а в точке 3 на четыре порядка ниже, чем значения мощности доз, полученные с применением других методов. Использование метода вынужденных столкновений понижает дисперсию ниже 10, но выше 5 % (сомнительные результаты) в точках 4 и 5. В остальных точках дисперсия значительно выше допустимых значений. Значения мощности доз в точках 1, 3, 4 и 6 в 1,5÷2 раза ниже, чем значения, полученные с использованием методов весовых

окон и задания различной ценности в ячейках. Значения мощностей доз, полученные с помощью прямого расчёта и с применением метода вынужденных столкновений, не верные. Методы весовых окон и различной ценности в ячейках понижают дисперсию до допустимых значений. Для этих двух методов оценивается качество доверительных интервалов. Согласно инструкции по MCNP предполагается, что средняя величина имеет нормальное распределение. Центральная предельная теорема утверждает, что случайная величина, имеющая нормальное распределение, попадает в доверительный интервал $X \pm \sigma$ с вероятностью 68 %, в доверительный интервал $X \pm 2\sigma$ с вероятностью 95 % и интервал $X \pm 3\sigma$ с вероятностью 99 %. На рисунке 4 приведены значения мощности доз с доверительными интервалами равными $X \pm 3\sigma$. Синим цветом на рисунке 4 обозначены доверительные интервалы для метода весовых окон, розовым – для различной ценности в ячейках. В таблице 4 приведено количество непройденных статистических проверок и сами непройденные статистические проверки. Для непройденных статистических проверок в скобках указаны характеристики, при которых они считаются пройденными.

Таблица 4. Количество непройденных статистических проверок

Номер точки детектирования	Метод MAGIC (весовые окна)	Различная ценность в ячейках
1	0	1 тангенс угла наклона равен 2,7 (меньше 3)
2	0	2 1.VOV равен 0,11 (больше 0,1) 2.FOM – уменьшается
3	1 тангенс угла наклона равен 2,11 (меньше 3)	1 тангенс угла наклона равен 1,66 (меньше 3)
4	1 тангенс угла наклона равен 2,15 (меньше 3)	2 1) среднее уменьшается (должно иметь небольшие колебания) 2) тангенс угла наклона равен 2,04 (меньше 3)
5	0	0
6	1 тангенс угла наклона равен 1,88 (меньше 3)	3 1) VOV равен 0,15 (больше 0,1) 2) FOM уменьшается (должно иметь небольшие колебания) 3) тангенс угла наклона равен 1,88 (меньше 3)

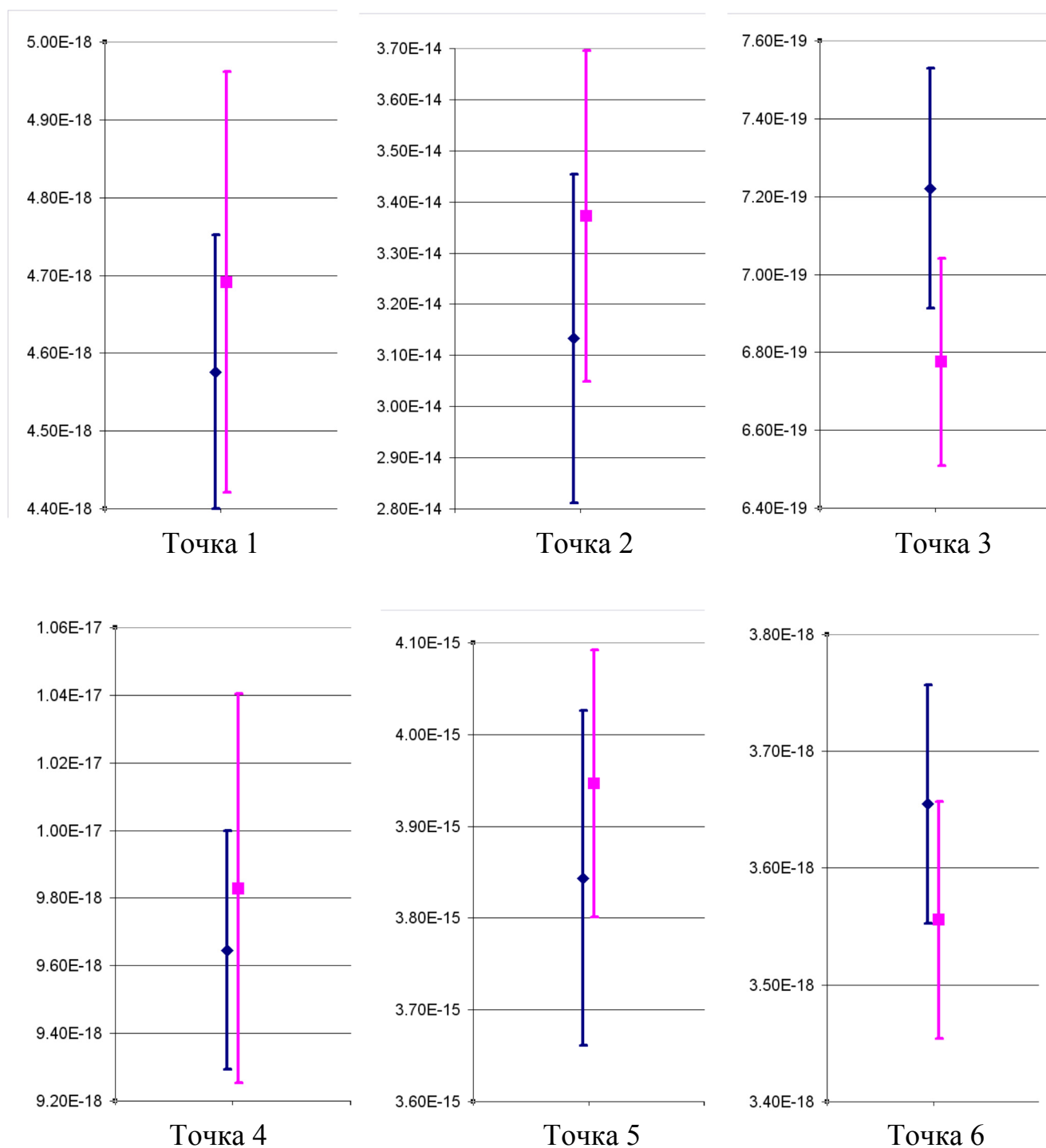


Рис. 5. Доверительные интервалы

Из рисунка 5 видно, что доверительные интервалы, полученные с помощью методов весовых окон и задания различной ценности в ячейках имеют общие значения. Эти два метода эффективно понижают дисперсию. Для точки 5 получается более надёжный доверительный интервал и для метода задания различной ценности в ячейках и для метода весовых окон, а для точек 1 и 2 более надёжный доверительный интервал получается при применении метода весовых окон, т. к. для этих точек пройденными оказались все статистические проверки.

Заключение

В работе проведены расчёты двумерной тестовой модели защиты ТУК для отработавшего ядерного топлива методом Монте-Карло с применением методов понижения дисперсии.

Прямой расчёт задачи даёт неудовлетворительные результаты. Использование метода вынужденных столкновений не даёт результатов с допустимой погрешностью. Методы задания различной ценности в ячейках и метод весовых окон понижают дисперсию до допустимых значений. Статистическая погрешность мощностей доз, полученных с применением этих двух методов, имеет значения меньше допустимых.

Список литературы

1. Суслов И.Р., Девкина Е.В., Лямцев И.А., Чернов В.А. Двухмерная тестовая модель защиты ТУК для отработавшего ядерного топлива: Препринт № 3278. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2017.
2. WAGNER J.C., PEPLOW D.E., MOSHER S.W. and EVANS T.M., Review of Hybrid (Deterministic/Monte Carlo) Radiation Transport Methods, Codes, and Applications at Oak Ridge National Laboratory, Progress in NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 2, pp.808-814 (2011).
3. Briesmeister J.F. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version4B, LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, March, 1997.
4. Защита от ионизирующих излучений: В 2 т. Т. 1. Физические основы защиты от излучений: Учебник для вузов / Н.Г. Гусев, В.А. Климанов, В.П. Машкович, А.П. Суворов; Под ред. Н.Г. Гусева. – 3-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Чернов С.В., Сонько А.В., Хоромский В.А. Расчёт полей излучений методом итераций «весовых окон в проекте» АСММ 10/100 кВт // Тезисы докладов 10-й юбилейной Российской конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях». – Москва-Обнинск, 2015. – С. 9–10.
6. Девкина Е.В., Николаев А.Н., Суслов И.Р., Чернов В.А. Проведение расчётов в обоснование радиационной безопасности при выгрузке и разборке активных зон отработавших выемных частей реакторов с жидкометаллическим теплоносителем АПЛ в п. Гремиха. // Тезисы докладов 10-й юбилейной Российской конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях». – Москва-Обнинск, 2015. – С. 137–138.

Подписано к печати 31.10.2018.
Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Усл. п. л. 0,6. Уч.-изд. л. 0,8.
Тираж 30 экз. Заказ № 295.

Отпечатано в ОНТИ методом прямого репродуцирования с оригинала авторов.
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.
ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского.