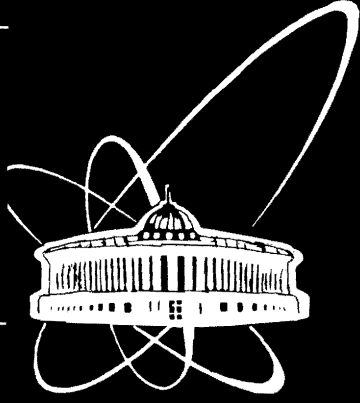


JINR - P11 - 2000 - 56



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

ОСНОВ
LIBRARY

P11-2000-56

А.В.Белушкин, С.А.Манюшин

РАСЧЕТ ЗЕРКАЛЬНЫХ НЕЙТРОНОВОДОВ
МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО



№	ИЗДАНИЕ	Год

2000

1. Введение

Зеркальные нейтронотоды позволяют существенно увеличить поток нейтронов на образце и минимизировать фон быстрых нейтронов и γ - лучей от нейтронного источника. Поэтому во многих современных нейтронных спекрометрах зеркальный нейтронотод является одной из важных составных частей. Вместе с тем данные устройства довольно дороги, стоимость зеркальных нейтронотодов достигает нескольких тысяч долларов за погонный метр. Имея в виду, что длина нейтронотодов составляет десятки метров, вопросы их оптимизации имеют исключительно важное значение. Для нейтронотода простой конфигурации расчеты характеристик можно провести аналитически, используя хорошо известные законы нейтронной оптики. Однако во многих случаях возникает необходимость создания нейтронотодов сложной геометрии (с комбинацией прямых и изогнутых секций, фокусирующих секций и т.д.) и с различным типом покрытия стенок нейтронотода, что позволяет минимизировать стоимость. Для расчета подобного типа устройств используется моделирование методом Монте-Карло. Кроме того, метод Монте-Карло позволяет рассчитывать дополнительные характеристики нейтронотода, например, потери и среднее число отражений нейтронов в зависимости от длины волны.

Целью данной работы было:

1. Проведение модельных расчетов для нейтронотодов простой конфигурации и сравнение результатов, полученных методом Монте-Карло, с аналитическими расчетами.
2. Расчет характеристик реального нейтронотода, установленного на реакторе ИБР-2, и сравнение результатов моделирования с экспериментом.

В следующей работе будут приведены результаты оптимизированных расчетов нейтронотода на реакторе ИБР-2, позволяющего при заданном расстоянии от источника до образца :

- а) избавиться от фона быстрых нейтронов и γ - излучения;
- б) получить максимальную плотность нейтронного потока на образце при требуемой угловой расходимости пучка и степени неравномерности потока по сечению образца.

2. Описание принципа работы используемых программ, новые возможности

За основу программного пакета были взяты коды, описанные в [1, 2]. Суть используемого подхода состоит в следующем.

Рассмотрим нейтроновод, состоящий из нескольких секций (прямые, изогнутые, сходящиеся). Каждая секция нейтроновода описывается шестью поверхностями: вход, выход, верхняя, нижняя, левая, правая стенки. Поверхность будем описывать квадратичной формой [1]:

$$T = Ax^2 + Bx + Cy^2 + Dy + Ez^2 + Fz + G + Pxy + Qyz + Rxz. \quad (1)$$

На рисунке 1 изображена прямая секция длиной 10 см и сечением 2,5 см x 8 см. Она описывается шестью уравнениями (1).

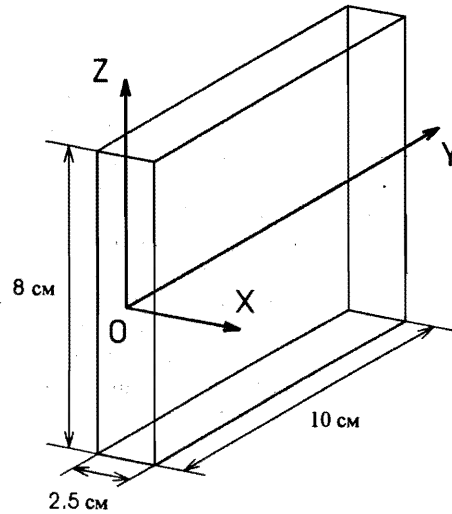


Рисунок 1. Прямая секция нейтроновода. OY – ось пучка нейтронов

Далее генерируется нейтрон со случайными координатами (x, y, z) и скоростями $\vec{V} = (V_x, V_y, V_z)$ на входной поверхности нейтроновода. Модуль вектора \vec{V} полагается равным единице. При этом проекции скорости V_x, V_y, V_z являются направляющими синусами и лежат в пределах: $-\gamma_c \leq V_x \leq \gamma_c$, $-\gamma_c \leq V_z \leq \gamma_c$, а V_y рассчитывается из условия равенства модуля вектора \vec{V} единице: $V_y = \sqrt{1 - V_x^2 - V_z^2}$. (Учтено, что критический угол γ_c мал и, следовательно, $\sin(\gamma_c) \approx \gamma_c$.) Нейтрон имеет вес $W = h \cdot d \cdot 4 \cdot \gamma_c^2 \cdot F$, где h, d - поперечные размеры первой (захватывающей) секции нейтроновода, $4 \cdot \gamma_c^2$ - телесный угол захвата при условиях $\gamma_c > h/L$ и $\gamma_c > d/L$ для прямого

нейтроновода, F – поток нейтронов $\left[\frac{\text{нейтрон}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стерадиан}} \right]$, γ_c – критический

угол. Если в изогнутом нейтроноводе длина прямого видения превышает длину нейтроновода, выполнения условий $\gamma_c > h/L$ и $\gamma_c > d/L$ не требуется. Далее производится проверка, насколько реален нейтрон с данными характеристиками для системы замедлитель-нейтроновод. Для этого знак проекций скорости нейтрона (V_x, V_y, V_z) изменяется на противоположный. Следовательно, движение нейтрона будет осуществляться в направлении замедлителя. После того, как нейтрон достигает плоскости, в которой расположен замедлитель, проверяется, попал ли нейтрон непосредственно на поверхность замедлителя. Если не попал, то такой нейтрон исключается из дальнейших расчетов. Таким образом учитываются потери системы замедлитель-нейтроновод.

После вышеописанной проверки нейтрон начинает движение по нейтроноводу, отражается в соответствии с законами нейтронной оптики, либо поглощается стенкой нейтроновода.

Если нейтрон падает на отражающую поверхность под углом меньшим критического $\gamma \leq \gamma_c$, то происходит отражение нейтрона. Если $\gamma > \gamma_c$, нейтрон считается потерянным. Если нейтрон достигает выхода нейтроновода, он далее транспортируется к образцу. В процессе каждого отражения вес нейтрона умножается на коэффициент отражения k соответствующей поверхности. Этот процесс повторяется $10^3 - 10^6$ раз. Выходные параметры затем усредняются по всему ансамблю и вычисляются статистические характеристики.

На основе изложенных подходов и на базе кодов [1,2] написана программа mcsguide-new на языке программирования FORTRAN F77-GNU для операционной системы RED HAT LINUX-6.1. Учитывая, что FORTRAN F77 существует почти для всех операционных систем, снимается проблема переносимости программы.

Программа состоит из нескольких вспомогательных подпрограмм, описывающих движение, отражение и нахождение положения нейтрона в нейтроноводе, нахождение времени пролета нейтрона до заданной поверхности и др. (библиотека MCLIB [1]). Все параметры подпрограмм сделаны формальными (за исключением параметров в (1)) для будущих усовершенствований.

В новой версии можно рассчитывать нейтроноводы с более сложной конструкцией. Возможна также установка суперзеркал, коллиматоров и обычных зеркал. Для каждой поверхности секций нейтроновода задается свой коэффициент отражения k и критический угол γ_c .

Стало возможным располагать замедлитель и нейтроновод весьма произвольно благодаря возможности смещения замедлителя относительно оси первой (захватывающей) секции нейтроновода. Соответственно, усовершенствована подпрограмма генерации нейтрона со случайными координатами и скоростями. Это позволяет оценивать потери для более сложных систем замедлитель-нейтроновод.

Добавлен расчет углового распределения нейтронов на выходе. Также добавлены расчеты дисперсий потока нейтронов на выходе нейтроновода и на образце в зависимости от длины волны.

В программу введены модули, осуществляющие контроль ошибок (деление на 0, и др.) и записывающие сообщения об ошибках в специальный файл ошибок. Эта мера позволила исключить зависание программы в случае некорректных исходных данных или в случае неудачной работы генератора случайных чисел.

В новой версии программы появилась возможность анализировать поток нейтронов на образцах круглого сечения.

Для наглядного представления моделирования в программу добавлен процесс визуализации нейтронов, влетающих и вылетающих из нейтроновода, а также попадающих на круглый или прямоугольный образец. При этом использовалась графическая библиотека PGPLOT [3]. При необходимости, для более быстрого выполнения программы визуализация может быть отключена.

3. Примеры расчета простых нейтроноводов и сравнение с аналитическими выражениями

а) Прямой зеркальный нейтроновод

Рассмотрим прямой нейтроновод длиной $L = 20$ м, с поперечными размерами $d = 3$ см, $h = 3$ см, покрытый натуральным никелем ($\gamma_c = 0,0017\lambda$,

γ_c - в радианах, λ - в Å). Телесный угол захвата нейтронов нейтроноводом

$\Omega = 4 \cdot \gamma_c^2$ для $\gamma_c > h/L$ и $\gamma_c > d/L$. Эти условия выполняются для $\lambda \geq 1 \text{Å}$.

Принимая поток нейтронов на входе равным единице $\Phi_{\text{вход}} = 1$, получаем, что

поток нейтронов на выходе $\Phi_{\text{выход}}^H = 4\gamma_c^2 hd$. Для таких же размеров

коллиматора с абсолютно поглощающими стенками геометрический телесный

угол захвата $\Omega_0 = hd/L^2$. Соответственно, поток нейтронов на выходе

$\Phi_{\text{выход}}^K = (hd)^2 / L^2$ [4]. Описанный выше нейтроновод рассчитывался также с

помощью программы mcguide-new. Результаты расчетов приведены на

рисунке 2 в сравнении с аналитическим результатом. Фактор выигрыша

нейтроновода над коллиматором равен $G = 4\gamma_c^2 L^2 / hd$ [4,5] и представлен на

рисунке 3.

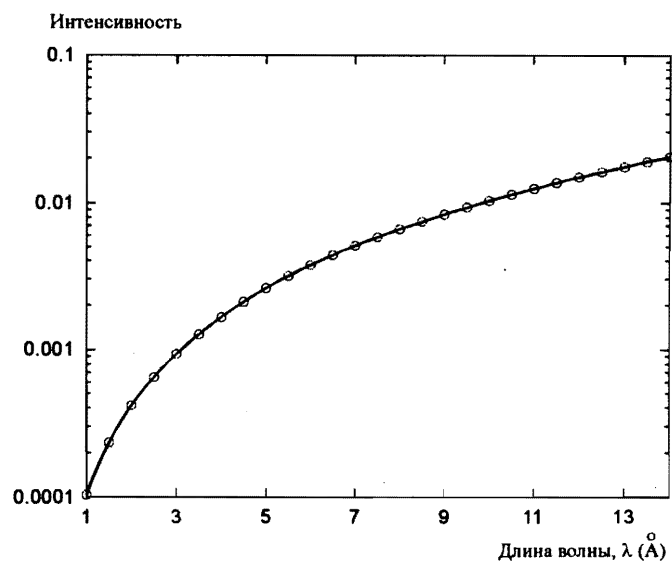


Рисунок 2. Поток нейтронов на выходе прямого нейтроновода. Непрерывная линия - аналитическая зависимость, кружки - расчет методом Монте-Карло

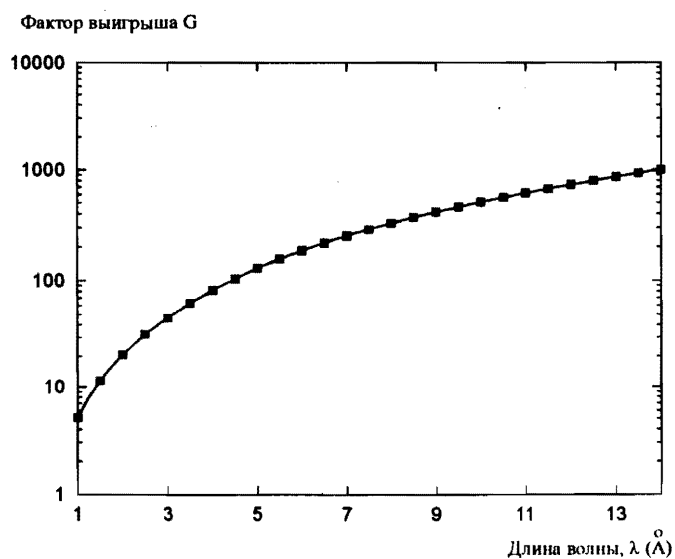


Рисунок 3. Фактор выигрыша нейтроновода по сравнению с неотражающим коллиматором. Непрерывная линия - аналитическая зависимость, квадраты - рассчитанные методом Монте-Карло данные

Среднее число отражений нейтронов от стенок в прямом нейтроноводе дается следующей формулой [5]:

$$N_{\text{сред}} = 0.5\gamma_c(1/h + 1/d)L. \quad (2)$$

На рисунке 4 приведен расчет методом Монте-Карло среднего числа отражений в сравнении с аналитическим результатом.

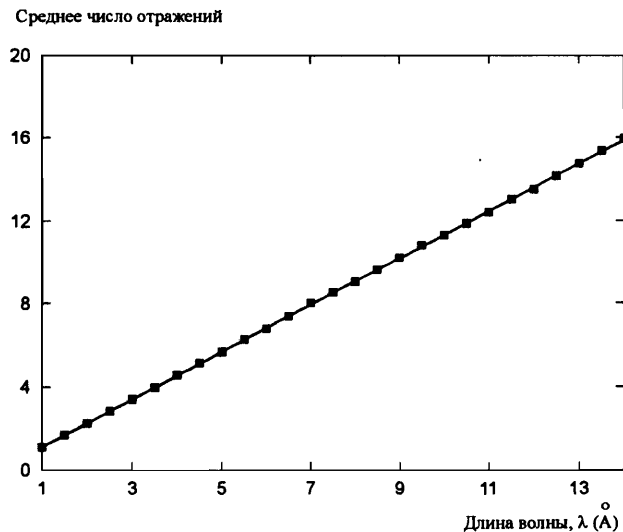


Рисунок 4. Среднее число отражений нейтронов от стенок в прямом нейтроноводе. Непрерывная линия - аналитическая зависимость, квадраты - рассчитанные данные по методу Монте-Карло

Увеличение среднего числа отражений с ростом длины волны связано с ростом критического угла.

б) Равномерно изогнутый зеркальный нейтроновод

Рассмотрим теперь изогнутый нейтроновод длиной $L = 20$ м, с поперечными размерами $d = 2$ см, $h = 18$ см, радиусом кривизны $R = 1900$ м, покрытый натуральным никелем ($\gamma_c = 0,0017\lambda$). Принимая поток нейтронов на входе нейтроновода равным единице $\Phi_{\text{вход}} = 1$, поток нейтронов на выходе нейтроновода описываем следующей формулой [6]:

$$\Phi_{\text{выход}}^{\text{нн}}(U) = \begin{cases} 2/3U^2[4\gamma_c^2hd] & \text{для } U \leq 1 \\ 2/3U^2[1 - (1 - U^{-2})^{3/2}][4\gamma_c^2hd] & \text{для } U > 1, \end{cases} \quad (3)$$

где $U = \frac{\gamma_c}{\gamma}$, $\gamma_c = 0,0017\lambda$, $\gamma^* = \sqrt{\frac{2d}{R}}$.

Характеристическую длину волны λ^* для изогнутого нейтроновода можно рассчитать по формуле [8]:

$$\lambda^* = \frac{\sqrt{\frac{2d}{R}}}{\sqrt{\frac{Na_c}{\pi}}},$$

где a_c - когерентная амплитуда рассеяния вещества стенок нейтроновода в Å ,
 N - плотность ядер в Å^{-3} , λ^* - характеристическая длина волны в Å .

Характеристическая длина волны для рассматриваемого нейтроновода равна $\lambda^* \approx 2,7 \text{Å}$.

Расчет потока нейтронов на выходе рассматриваемого нейтроновода с использованием вышеприведенной формулы и по методу Монте-Карло приведен на рисунке 5.

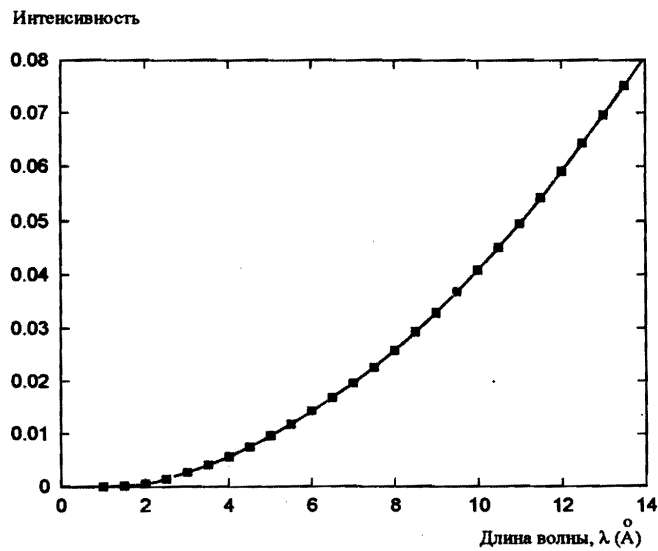


Рисунок 5. Поток нейтронов на выходе изогнутого нейтроновода. Непрерывная линия - аналитическая зависимость, квадраты - рассчитанные данные по методу Монте-Карло

На рисунке 6 приведен расчет методом Монте-Карло среднего числа отражений нейтронов от стенок в рассматриваемом изогнутом нейтроноводе в сравнении с аналитическим расчетом числа отражений нейтронов от стенок для прямого нейтроновода тех же размеров.

Среднее число отражений

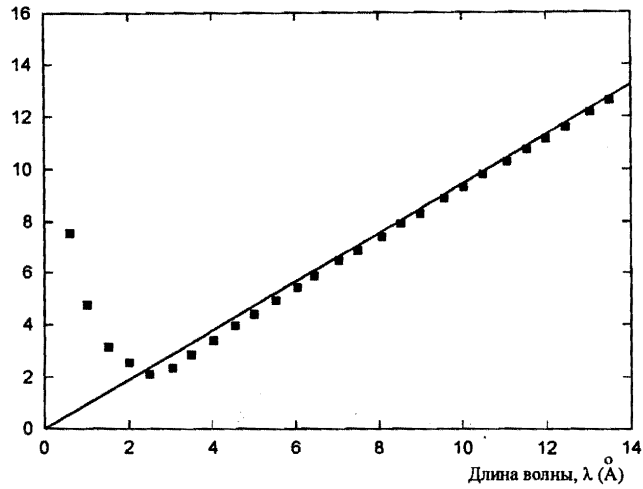


Рисунок 6. Среднее число отражений нейтронов от стенок для изогнутого нейтроновода (квадраты – расчет методом Монте-Карло) и для прямого нейтроновода тех же размеров (линия – аналитический расчет по формуле (2))

Видно, что для длин волн $\lambda > \lambda^* = 2,7 \text{ \AA}$ среднее число отражений в изогнутом нейтроноводе хорошо описывается формулой для прямого нейтроновода. Это объясняется тем, что для длин волн $\lambda > \lambda^*$ нейтроны движутся зигзагом, отражаясь от всех стенок, аналогично движению в прямом нейтроноводе. Но для длин волн $\lambda < \lambda^*$ нейтроны в изогнутом нейтроноводе движутся, отражаясь только от вогнутой (внешней) стенки (гирляндой), чего в прямом нейтроноводе не происходит. При этом нейтроны с характеристической длиной волны достигают конца нейтроновода, испытывая наименьшее число отражений. Различный характер транспорта нейтронов в изогнутом нейтроноводе для $\lambda > \lambda^*$ и $\lambda < \lambda^*$ приводит к существенной неравномерности плотности нейтронного потока для длин волн $\lambda < \lambda^*$ на выходе такого нейтроновода. Этот эффект хорошо наблюдается, если использовать в программе mcguide-new визуализацию нейтронного потока на входе и выходе изогнутого нейтроновода.

в) Учет потерь нейтронного потока за счет конечного расстояния от замедлителя до входа в нейтроновод

Рассчитаем вышеописанный изогнутый нейтроновод с учетом потерь в системе замедлитель-нейтроновод. Для замедлителя квадратного сечения с длиной ребра m в [5] предложена аналитическая зависимость для коэффициента потерь:

$$K_n = 1 - \frac{\{L_{2-n}\gamma_c - 0.5(m-h)\}^2}{2\gamma_c L_{2-n} h},$$

8

где L_{z-n} - расстояние замедлитель-нейтроновод, h - высота нейтроновода, m - длина ребра квадратного замедлителя ($h > a$, a - ширина нейтроновода).

Соответственно, поток нейтронов на выходе нейтроновода,

$$\Phi_{\text{выход}}^{n-2} = K_n \Phi_{\text{выход}}^{n-1}$$

Результаты расчета системы замедлитель-нейтроновод методом Монте-Карло в сравнении с аналитическими расчетами представлены на рисунке 7.

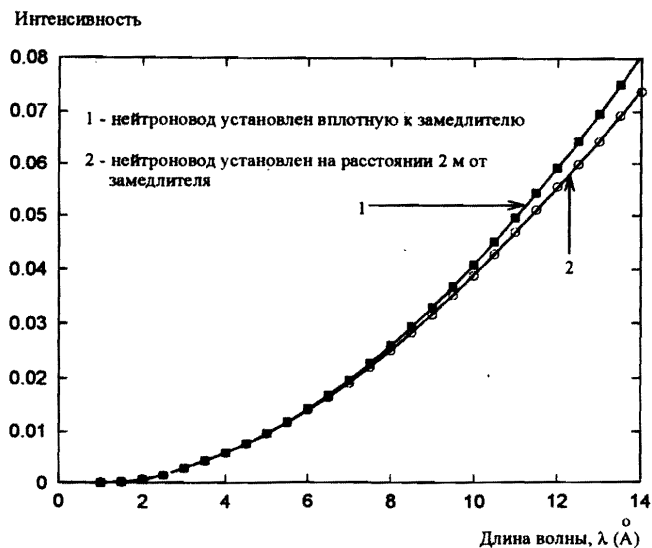


Рисунок 7. Поток нейтронов на выходе изогнутого нейтроновода без учета (линия 1) и с учетом (линия 2) потерь в системе замедлитель-нейтроновод. Непрерывные линии - аналитические зависимости, квадраты и окружности - рассчитанные данные методом Монте-Карло

г) Комбинированные нейтроноводы

Для уменьшения неравномерности потока на выходе нейтроновода применяют комбинированные нейтроноводы. При этом изогнутая секция позволяет избавиться от быстрых нейтронов и γ -излучения, а прямая секция, следующая за изогнутой, - достичь большей равномерности плотности нейтронов. С помощью программы mcguide-new были рассчитаны нейтроноводы с одинаковой первой изогнутой секцией, но с разной по длине следующей за ней прямой секцией. Поперечные размеры изогнутой и прямой секций принимались одинаковыми.

Нейтроновод 1: изогнутая секция длиной $L = 20$ м, радиусом кривизны $R = 1900$ м, поперечные размеры $d = 2$ см, $h = 18$ см, прямой секции нет.

Нейтронород 2: за изогнутой секцией, описанной выше, помещена прямая секция длиной 25 м.

Нейтронород 3: как нейтронород 2, но прямая секция длиной 30 м.

Нейтронород 4: как нейтронород 2, но прямая секция длиной 40 м.

На рисунке 8 приведен расчет среднеквадратичного отклонения плотности потока на выходе данных нейтронородов. Данные на рис. 8 нормированы на среднее значение плотности потока нейтронов, рассчитанного для конкретной длины волны, и выражены в %.

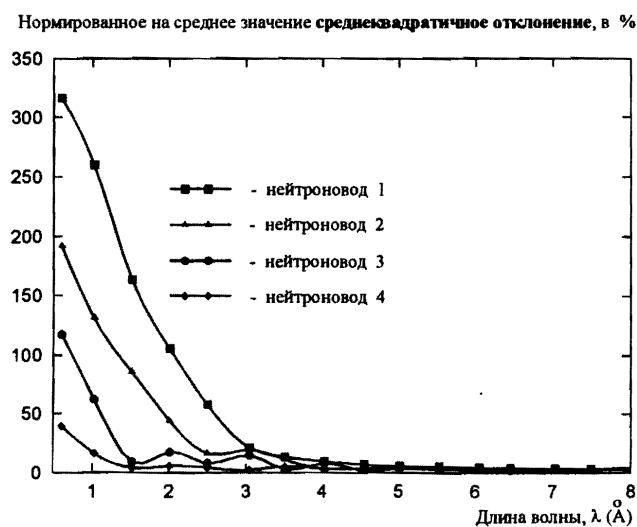


Рисунок 8. Среднеквадратичное отклонение плотности потока нейтронов на выходе комбинированных нейтронородов

Видно, что дополнительная прямая секция существенно понижает неравномерность плотности нейтронного потока на выходном сечении нейтронорода.

Вместе с тем очевидно, что установка дополнительной прямой нейтронородной секции уменьшает коэффициент пропускания комбинированного нейтронорода. Полагая коэффициент отражения нейтронов от стенок равным 0,98, был рассчитан коэффициент пропускания для каждого из рассматриваемых нейтронородов. Результаты приведены на рисунке 9.

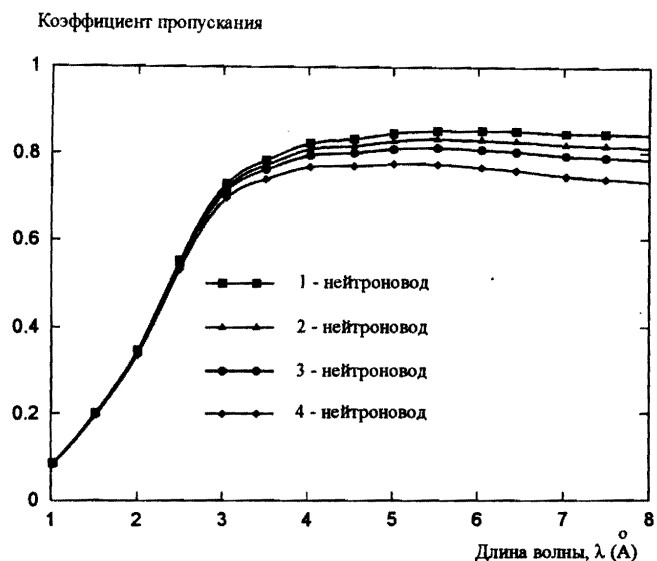


Рисунок 9. Коэффициенты пропускания нейтроноводов

Из рисунка видно, что при заданном коэффициенте отражения потери в пропускной способности не слишком велики и могут рассматриваться как оправданные для увеличения степени однородности нейтронного пучка.

4. Описание, конструкция и расчет нейтроновода дифрактометра ДН-2 на реакторе ИБР-2

Качество работы программы mcguide-new было протестировано на примере реального нейтроновода, установленного на дифрактометре ДН-2 на реакторе ИБР-2.

Нейтроновод собран из 50 стеклянных пластин размером 75 x 20 см, покрытых натуральным никелем [6,7].

При этом нейтроновод состоит из 3 секций: 1 – прямая длиной 150 см; 2 – изогнутая длиной 1350 см с радиусом кривизны 800 м; 3 – прямая длиной 375 см. Схематически нейтроновод показан на рисунке 10. Коэффициент отражения нейтронов от боковых стенок нейтроновода принимался равным 0,98 (стекло FLOAT, покрытое натуральным никелем) [6]. Верхние и нижние стеклянные стенки нейтроновода никелем не покрыты.

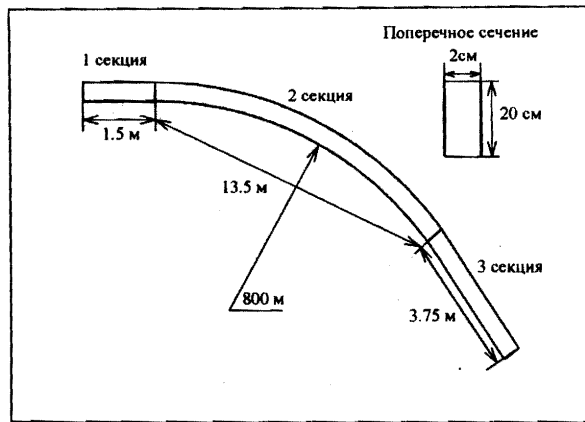


Рисунок 10. Конструкция нейтронновода ДН-2

Характеристическая длина волны нейтронновода ДН-2 равна $\lambda^* \approx 3 \text{ \AA}$, если принять данное в [7] отклонение нейтронного пучка 9,3 см на выходе из нейтронновода по отношению ко входу.

Измеренный на установке ЮМО спектр прямого пучка от водяного замедлителя реактора ИБР-2 представлен на рисунке 11.

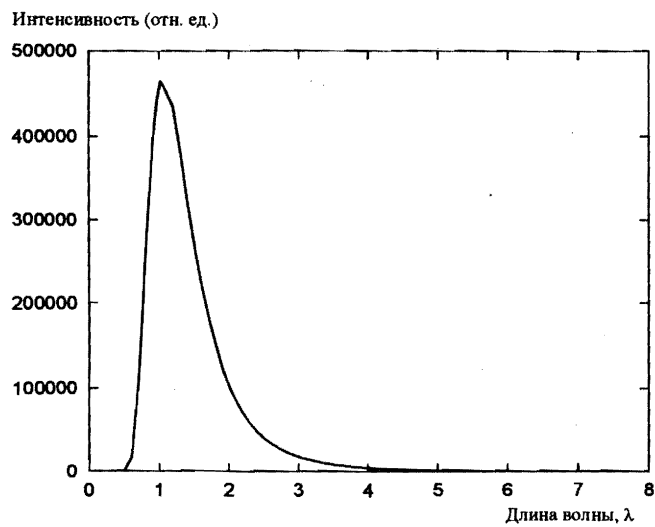


Рисунок 11. Спектр прямого пучка реактора ИБР-2

Приведенный спектр использован программой mcguide-new в качестве функции распределения нейтронов по длинам волн на входе в нейтронный волновод. В соответствии с требованием к исходным данным программы mcguide-new, предположим, что интенсивность выражена в $\left[\frac{\text{нейтрон}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стерадиан}} \right]$.

На рисунке 12 показаны результаты расчетов спектра нейтронов на выходе нейтронного волновода. Кривая 1 рассчитана в предположении идеально гладких стенок нейтронного волновода, а кривая 2 - в предположении шероховатых стенок с дисперсией шероховатости $\langle \sigma \rangle = 10^{-3}$. Квадраты соответствуют экспериментальным данным [7], нормированным так, чтобы экспериментальные и рассчитанные данные совпадали при $\lambda^2 = 3 \text{ \AA}$. Пунктиром на рис. 12 показан спектр нейтронов, отвечающий максвелловскому распределению в области больших длин волн (спадание интенсивности $\sim \lambda^{-4}$).

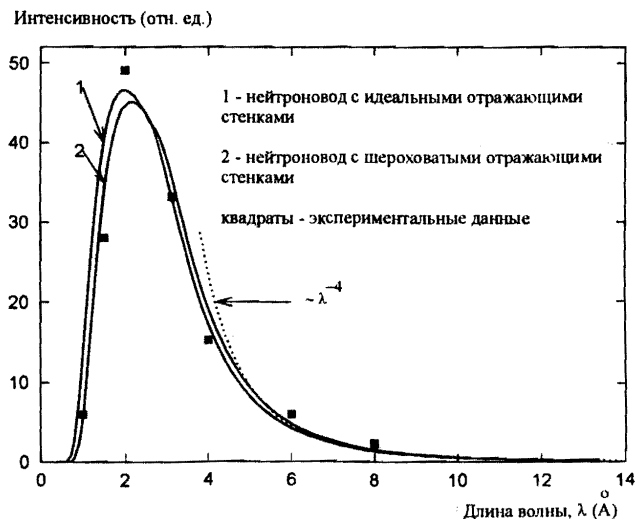


Рисунок 12. Расчет нейтронного волновода ДН-2 с разным качеством отражающей поверхности

В вышеприведенных расчетах предполагалось, что нижняя и верхняя стенки нейтронного волновода не отражают нейтроны. Если предположить, что верхняя и нижняя стенки нейтронного волновода являются также отражающими, то получается результат, приведенный на рисунке 13 в сравнении с предыдущим расчетом и экспериментальными данными.

Интересно отметить, что в случае, когда все четыре стенки нейтронного волновода являются отражающими, спадание спектра в области больших длин волн следует закону λ^{-3} . В работе [7] отмечено, что экспериментальный спектр на выходе нейтронного волновода ДН-2 в области больших длин волн подчиняется именно λ^{-3} , а не λ^{-4} , как следовало бы ожидать для

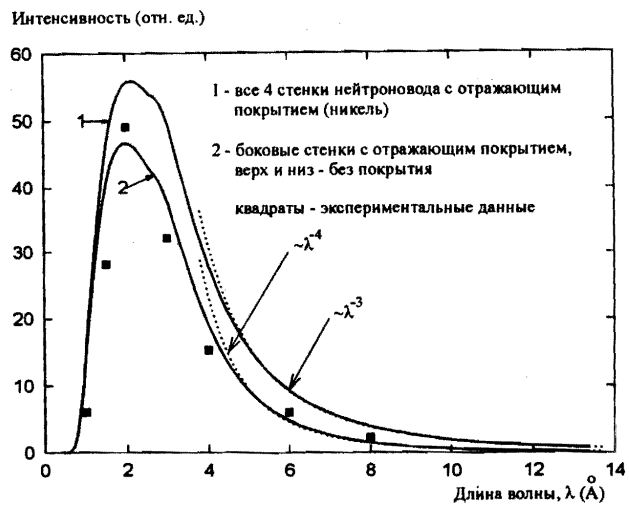


Рисунок 13. Расчет нейтронвода ДН-2 для разных типов покрытия стенок

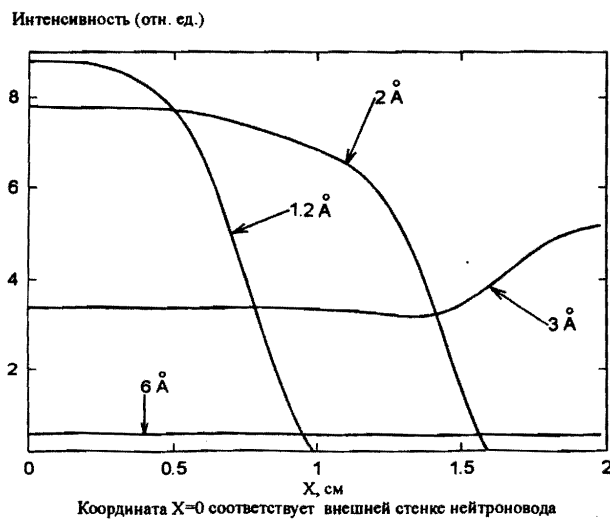


Рисунок 14. Зависимость интенсивности плотности потока нейтронов на выходе нейтронвода дифрактометра ДН-2 от горизонтальной координаты

максвелловского распределения. Проведенные расчеты позволяют утверждать, что данный факт обусловлен отражением нейтронов от нижней и верхней стенок нейтронвода ДН-2. Несмотря на то, что эти стенки у реального нейтронвода не имеют никелевого покрытия, дополнительная интенсивность обусловлена, очевидно, отражением нейтронов от стеклянного покрытия верхней и нижней стенок нейтронвода.

На рисунке 14 показано распределение плотности нейтронного потока по горизонтальному сечению нейтроновода для нескольких значений длины волны нейтронов. Как и следовало ожидать, с ростом длины волны увеличивается равномерность распределения потока по сечению нейтроновода.

На рисунке 15 показано распределение плотности потока нейтронов на месте образца дифрактометра ДН-2, то есть на расстоянии 1 м от выходного сечения нейтроновода. Качественно полученные зависимости хорошо согласуются с экспериментом [7]. Более того, характерный максимум распределения для длины волны 3 \AA наблюдался в эксперименте, но не был как-либо интерпретирован. Расчеты показывают, что указанная особенность является следствием конструкции нейтроновода дифрактометра ДН-2.

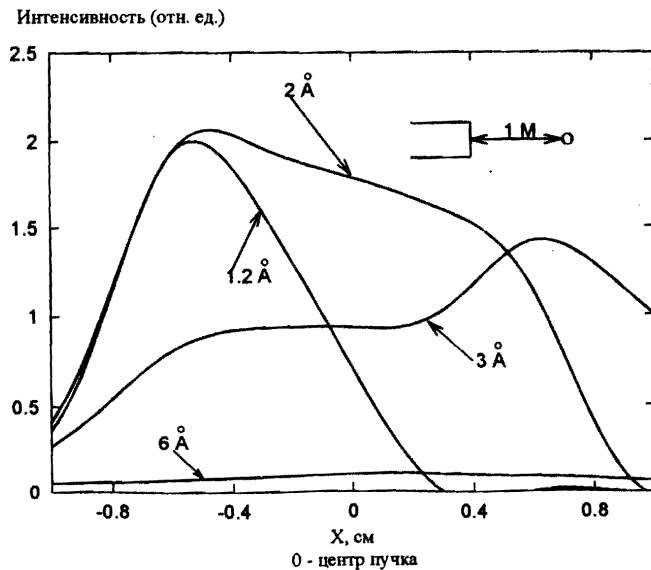


Рисунок 15. Зависимость интенсивности нейтронов от координаты X в горизонтальной плоскости на месте расположения образца

5. Угловое распределение нейтронного пучка на выходе нейтроновода спектрометра ДН-2

Для многих экспериментов (например, малоугловое рассеяние нейтронов) необходимо знать угловую расходимость пучка нейтронов. Отметим, что угловая расходимость пучка нейтронов, выходящих из нейтроновода, определяется критическим углом полного внешнего отражения для заданной длины волны. Новая версия программы позволяет рассчитывать искомое угловое распределение. Угол φ - это максимальный угол между осью последней секции нейтроновода и направлением вектора скорости нейтронов, вылетающих из нейтроновода спектрометра ДН-2. Результаты приведены на рисунке 16.

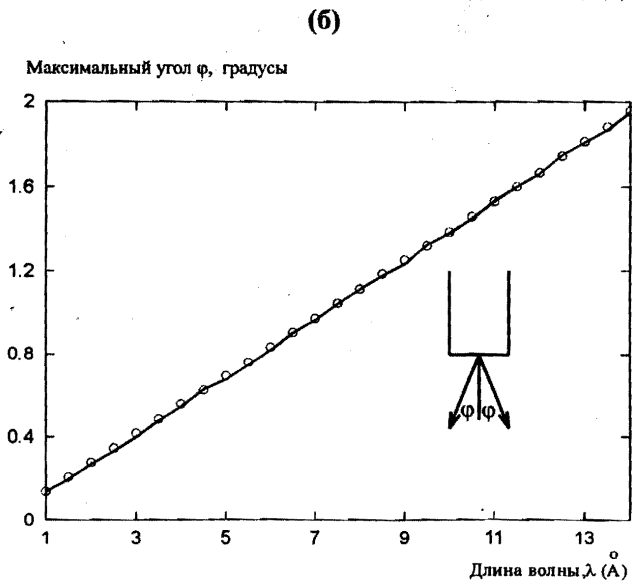
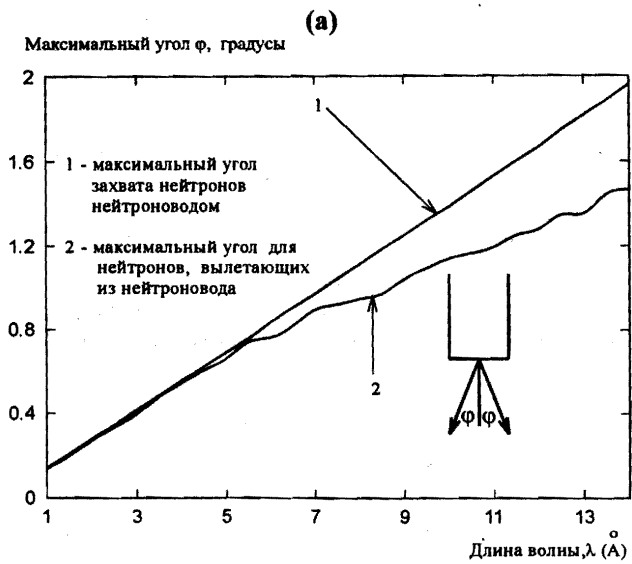


Рисунок 16. Угловое распределение нейтронного потока на выходе нейтроновода спектрометра ДН-2: (а) верхняя и нижняя стенки не отражают нейтроны; (б) все стенки отражающие, непрерывная линия – максимальный угол захвата нейтронов нейтроноводом, кружки – максимальный угол для нейтронов, вылетающих из нейтроновода

Интересно отметить, что в случае, если верхняя и нижняя стенки нейтронновода спектрометра ДН-2 не отражают нейтроны, на длинах волн больших характеристической происходит уменьшение максимального угла φ для нейтронов, вылетающих из нейтронновода. Тогда как, если все стенки нейтронновода отражают, угловые распределения нейтронного пучка на входе и выходе нейтронновода практически совпадают.

6. Влияние коэффициента отражения на коэффициент пропускания нейтронов нейтронноводом

Коэффициент отражения стекла FLOAT, покрытого натуральным никелем, равен 0,98 [6]. Однако можно предположить, что он не постоянная, а скорее случайная величина. Исследуем с помощью монте-карловского моделирования, как изменится коэффициент пропускания нейтронновода ДН-2 в случае несколько большего и меньшего коэффициента отражения. Результат представлен на рисунке 17.

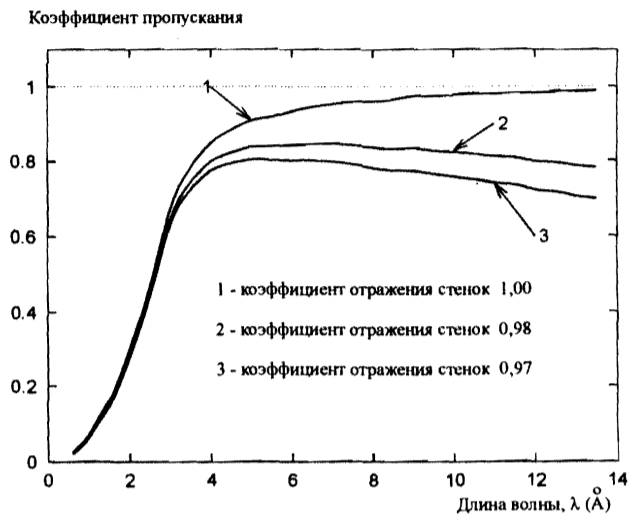


Рисунок 17. Коэффициент пропускания нейтронновода для разных значений коэффициента отражения нейтронов от его стенок

Из этого можно сделать вывод о том, что коэффициент отражения стенок нейтронновода весьма сильно влияет на пропускание нейтронов. Действительно, уменьшение или увеличение коэффициента отражения всего на 1-2% приводит к изменению пропускания на 10-20% в области длин волн, больших характеристической. Это предъявляет высокие требования к качеству покрытия.

7. Выводы

1. Применение моделирования позволяет получать надежные данные о характеристиках и параметрах нейтроноводов простой и сложной конструкций.
2. В рамках данной математической модели удается добиться хорошего согласия результатов, полученных методом Монте-Карло, с аналитическими расчетами.
3. Результаты моделирования нейтроновода спектрометра ДН-2 сравнивались с экспериментально измеренными. Было найдено хорошее согласие между модельным расчетом и экспериментально измеренными данными.

Авторы выражают искреннюю признательность доктору М. W. Johnson (Лаборатория Резерфорда-Эпплетона) за предоставление кодов MCLIB, MCGUIDE и разрешение их использования и модификации, а также д.ф.-м.н. А.М. Балагурову, к.ф.-м.н. А.И. Бескровному и к.ф.-м.н. Ю.В. Никитенко за обсуждение и ценные советы.

8. Литература

1. M. W. Johnson and C. Stephanou, 'MCLIB: A Library of Monte Carlo subroutines for neutron scattering problem,' Rutherford Laboratory report RL-78-090, September, 1978.
2. M. W. Johnson 'MCGUIDE: A thermal neutron guide simulation program,' Rutherford and Appleton Laboratories report RL-80-065, December, 1980.
3. <http://astro.caltech.edu/~tjp/pgplot>
4. H. Maier-Leibnitz and T. Springer 'The use of neutron optical devices on beam-hole experiments,' J. Nucl. Energy parts A/B 17 (1963) 217-255.
5. C.J. Carlile, M.W. Johnson and W.G. Williams, 'Neutron guides on pulsed sources,' Rutherford Laboratory report RL-79-084, November, 1979.
6. В.В. Корнилов, В.М. Назаров, В.П. Сысоев, В.П. Шамчук. Характеристики зеркальных нейтроноводов, изготовленных из стекла FLOAT. Препринт ОИЯИ Р13-80-496, Дубна, 1980.
7. А.М. Балагуров и др. Нейтронный дифрактометр на импульсном реакторе ИБР-2. Конструкция и параметры. Препринт ОИЯИ 3-84-291, Дубна, 1984.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 марта 2000 года.

Издательский отдел
Объединенного института ядерных исследований
предлагает Вам приобрести перечисленные ниже книги:

Индекс книги	Название книги
E3-97-213	Труды V Международного семинара по взаимодействию нейтронов с ядрами. Дубна, 1997, 446 с. (на англ. яз.)
D9-97-231	Труды международной школы молодых ученых «Проблемы ускорения заряженных частиц». Дубна, 1996, 285 с. (на русском и англ. яз.)
E2,4-97-263	Труды III международной конференции «Ренормгруппа-96». Дубна, 1996, 436 с. (на англ. яз.)
E10-97-272	Труды международного рабочего совещания «Системы сбора данных в экспериментах на нейтронных источниках». Дубна, 1997, 325 с. (на англ. яз.)
D19-97-284	Труды международного симпозиума «Проблемы биохимии, радиационной и космической биологии». Дубна, 1997, 2 тома: 284 и 405 с. (на русском и англ. яз.)
P14-97-343	Труды Национальной конференции по применению рентгеновского синхротронного излучения нейтронов и электронов для исследования материалов. Дубна, 1997, 3 тома, 370 с., 448 с., 340 с. (на русском яз.)
P2-97-401	Труды IX международного семинара «Гравитационная энергия и гравитационные волны». Дубна, 1996, 194 с. (на русском яз.)
E2-97-413	Труды VII Международного совещания по спиновой физике высоких энергий (СПИН-97). Дубна, 1997, 398 с. (на англ. яз.)
E15-98-57	Труды III Международного совещания по исследованию сверхтонкой структуры и ядерных моментов экзотических ядер методами лазерной спектроскопии. Познань, 1997, 200 с. (на англ. яз.)
D13-98-66	Труды XVII Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1997, 242 с. (на русском и англ. языках)
E1,2-98-154	Труды XIII международного семинара по проблемам физики высоких энергий «Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика». Дубна, 1996, 2 тома, 300 с. и 282 с. (на англ. яз.)
E3,14-98-168	Труды Германо-Российского совещания пользователей ИБР-2. Дубна, 1998, 126 с. (на англ. яз.)
E3-98-202	Труды VI Международного семинара по взаимодействию нейтронов с ядрами. Дубна, 1998, 352 с. (на англ. яз.)
D1,2-98-215	Труды международного совещания «Релятивистская ядерная физика — от сотен МэВ до ТэВ». Дубна, 1998, 384 с. (на русском и англ. яз.)
D -98-224	Труды II Открытой научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ. Дубна, 1998, 190 с. (на русск. и англ. языках)
P1-98-231	А.Любимов, Д.Киш. Введение в экспериментальную физику частиц. Дубна, 1998, 330 с. (на русском яз.)
E2-98-254	Труды рабочего совещания «Адронные атомы и позитроны в стандартной модели». Дубна, 1998, 259 с. (на англ. яз.)
D9,11-98-273	Труды международной конференции «Динамика пучков и оптимизация». Дубна, 1997, 162 с. (на русском и англ. языках)
E17,19-98-305	Труды международного рабочего совещания «Дейтерирование биологических молекул для структурных и динамических исследований. Применение для нейтронного рассеяния и ЯМР». Дубна, 1998, 100 с. (на англ. яз.)

Индекс книги	Название книги
E1,2-98-307	Труды международной школы-семинара «Актуальные проблемы физики частиц». Гомель, 1997, 2 тома, 304 с. и 220 с. (на англ. яз.)
E2-98-372	Труды III международного совещания «Классические и квантовые интегрируемые системы». Ереван, 1998, 200 с. (на англ. яз.)
E9-99-26	Труды XVII Международной конференции по ускорителям высоких энергий. Дубна, 1998, 432 с. (на англ. яз.)
E2-99-35	Труды XI международной конференции «Проблемы квантовой теории поля». Дубна, 1998, 508 с. (на англ. яз.)
E5-99-38	Труды международного совещания «Самоподобные системы». Дубна, 1998, 404 с. (на англ. яз.)
P3,14,17-99-75	Труды VIII Школы по нейтронной физике. Дубна, 1998, 330 с. (на русском яз.)
E9-99-92	Труды Международного совещания МЕЕС'98. Дубна, 1998, 302 с. (на англ. яз.)
Д -99-94	Труды III Открытой научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ. Дубна, 1999. 258 с. (на русск. и англ. языках) И.А.Шелаев. Введение в необратимую электродинамику. Дубна, 1999, 288 с. (на русском яз.)

За дополнительной информацией просим обращаться в издательский отдел ОИЯИ по адресу:

141980, г.Дубна, Московской области,
ул.Жолио-Кюри, 6.
Объединенный институт ядерных исследований,
издательский отдел
E-mail: publish@pds.jinr.dubna.su

Белушкин А.В., Маношин С.А.

P11-2000-56

Расчет зеркальных нейтроноводов методом Монте-Карло

Приводится новая версия программы mcguide-new для моделирования систем нейтроновод-коллиматор сложной конфигурации методом Монте-Карло. Проведены модельные расчеты для нейтроноводов простой конфигурации и сделано сравнение результатов, полученных методом Монте-Карло, с аналитическими расчетами. Рассчитаны характеристики реального нейтроновода, установленного на реакторе ИБР-2, и произведено сравнение результатов моделирования с экспериментом. В рамках данной математической модели удалось добиться хорошего согласия результатов, полученных методом Монте-Карло, с аналитическими расчетами и экспериментальными данными.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2000

Перевод авторов

Belushkin A.V., Manoshin S.A.

P11-2000-56

Monte Carlo Calculation of Mirror Neutron Guides

A new version of the mcguide-new program for the modeling of a neutron guide-collimator system with a complex configuration by the Monte Carlo method is described. A model simulation of a simple-configuration neutron guide is carried out and the Monte Carlo results are compared with the results of analytical calculations. The parameters of a real neutron guide at the IBR-2 reactor are calculated and a comparison of the results of the modeling with the experiment is conducted. The given theoretical model helps to achieve good agreement of Monte Carlo calculations with analytical and experimental data.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2000