

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Дубна**

P11-2000-56

А.В.Белушкин, С.А.Маношин

**РАСЧЕТ ЗЕРКАЛЬНЫХ НЕЙТРОНОВОДОВ  
МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО**

**2000**

## 1. Введение

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

Целью данной работы было:

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

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

- а) избавиться от фона быстрых нейтронов и  $\gamma$  - 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).

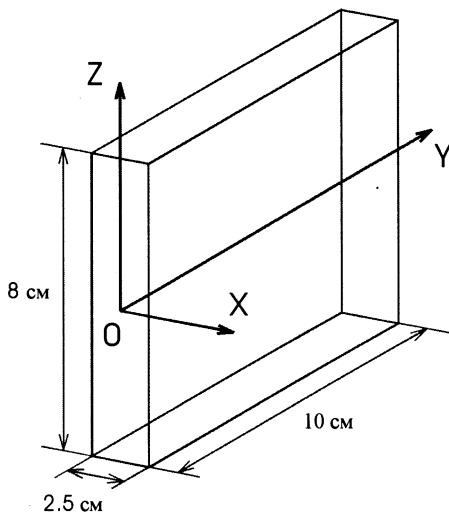


Рисунок 1. Прямая секция нейтроновода. OY – ось пучка нейтронов

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  $\gamma_c$  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  $\left[ \frac{\text{нейтрон}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стерадиан}} \right]$ ,  $\gamma_c$  - 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 mcguide-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  $\gamma_c$ .

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 нейтронновода 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.

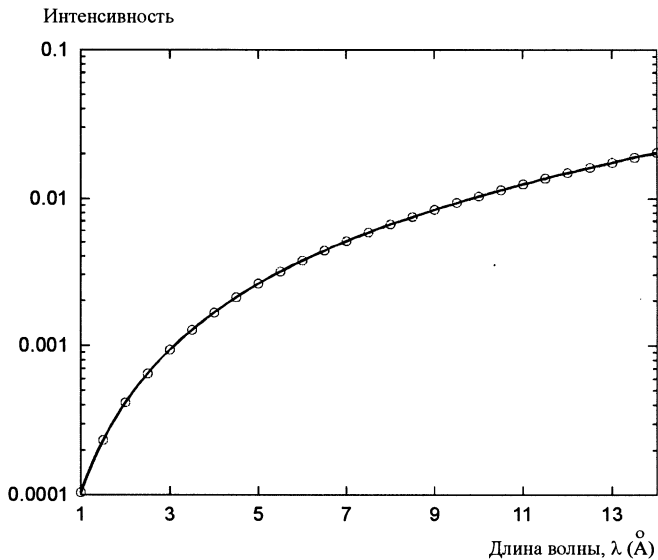
В новой версии программы появилась возможность анализировать поток нейтронов на образцах круглого сечения.

Для наглядного представления моделирования в программу добавлен процесс визуализации нейтронов, влетающих и вылетающих из нейтронновода, 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.

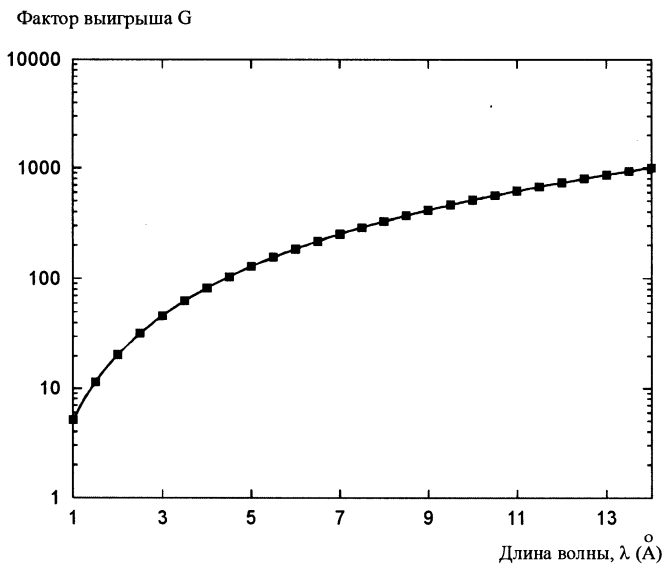
### 3. Примеры расчета простых нейтронноводов и сравнение с аналитическими выражениями

#### а) Прямой зеркальный нейтронновод

Рассмотрим прямой нейтронновод длиной  $L = 20$  м, с поперечными размерами  $d = 3$  см,  $h = 3$  см, покрытый натуральным никелем ( $\gamma_c = 0,0017\lambda$ ,  $\gamma_c$  - в радианах,  $\lambda$  - в  $\text{Å}$ ). Телесный угол захвата нейтронов нейтронноводом  $\Omega = 4 \cdot \gamma_c^2$  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 нейтронновод рассчитывался также с помощью программы mcguide-new. Результаты расчетов приведены на рисунке 2 в сравнении с аналитическим результатом. Фактор выигрыша нейтронновода 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 нейтронвода. Непрерывная линия - аналитическая зависимость, кружки - расчет методом Монте-Карло

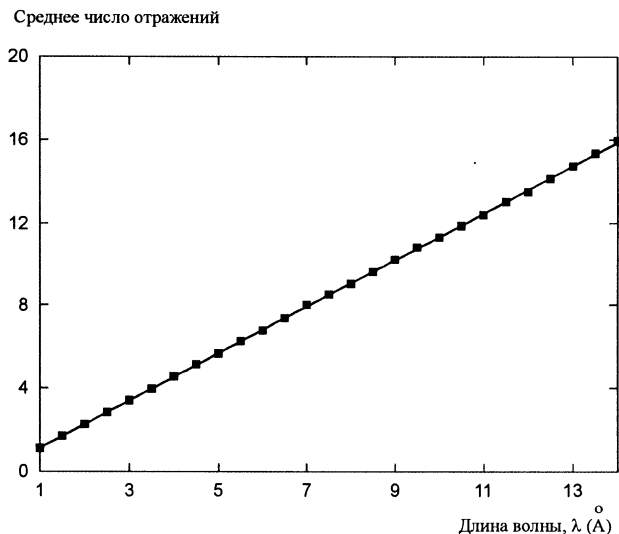


**Рисунок 3.** Фактор выигрыша нейтронвода по сравнению с неотражающим коллиматором. Непрерывная линия - аналитическая зависимость, квадраты - рассчитанные методом Монте-Карло данные

Среднее число отражений нейтронов от стенок в прямом нейтронноводе 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 нейтронноводе. 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 нейтронновод*

Рассмотрим теперь изогнутый нейтронновод 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 нейтронновода равным единице  $\Phi_{\text{вход}} = 1$ , поток нейтронов на выходе нейтронновода описываем следующей формулой [6]:

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

где  $U = \frac{\gamma_c}{\gamma^*}$ ,  $\gamma_c = 0.0017\lambda$ ,  $\gamma^* = \sqrt{\frac{2d}{R}}$ .

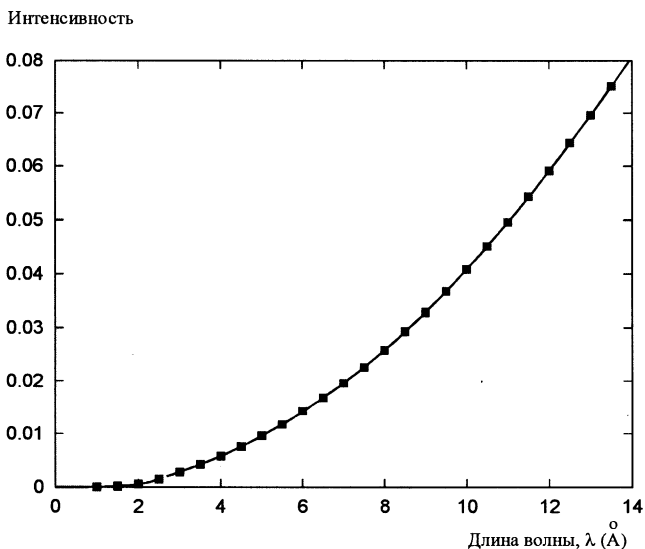
Характеристическую длину волны  $\lambda^*$  для изогнутого нейтронотода можно рассчитать по формуле [8]:

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

где  $a_c$  - когерентная амплитуда рассеяния вещества стенок нейтронотода в  $\text{Å}$ ,  
 $N$  - плотность ядер в  $\text{Å}^{-3}$ ,  $\lambda^*$  - характеристическая длина волны в  $\text{Å}$ .

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

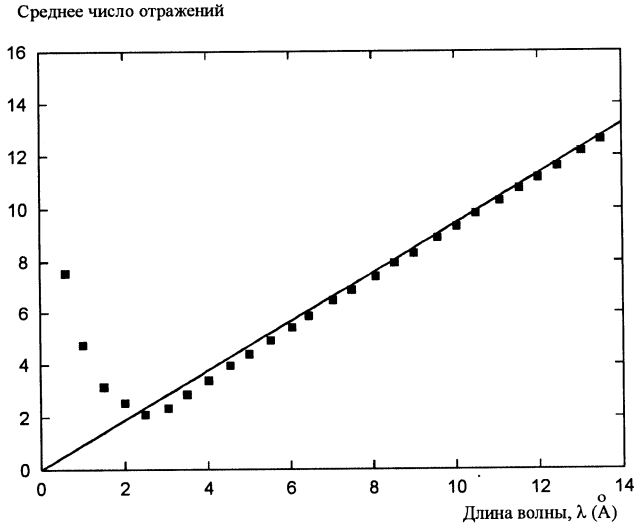
Расчет потока нейтронов на выходе рассматриваемого нейтронотода с использованием вышеприведенной формулы и по методу Монте-Карло приведен на рисунке 5.



**Рисунок 5.** Поток нейтронов на выходе изогнутого нейтронотода. 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 нейтронотоде в сравнении с аналитическим расчетом числа отражений нейтронов от стенок для прямого нейтронотода тех же размеров.





**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 mcsguide-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:

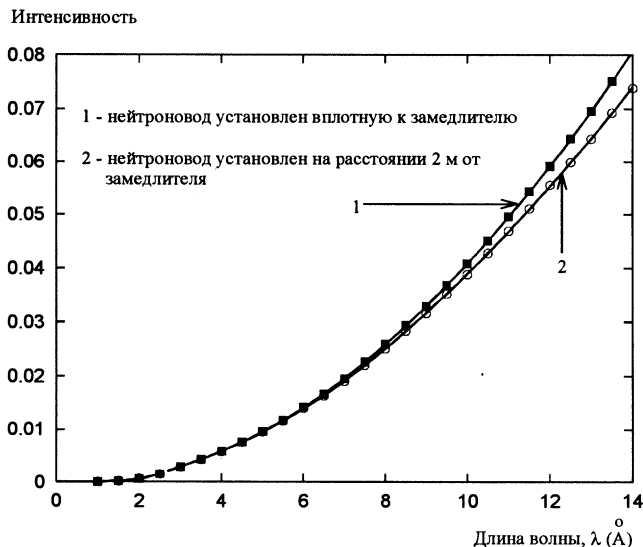
$$K_n = 1 - \frac{\{L_{3-n}\gamma_c - 0.5(m-h)\}^2}{2\gamma_c L_{3-n} h},$$

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,

$$\Phi_{\text{выход}}^{n-3} = K_n \Phi_{\text{выход}}^{nn}$$

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  $\gamma$ -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.

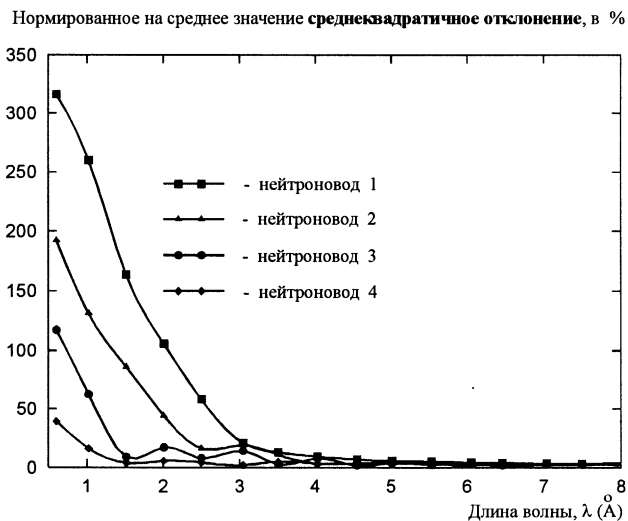
**Нейтроновод 1:** изогнутая секция длиной  $L = 20$  м, радиусом кривизны  $R = 1900$  м, поперечные размеры  $d = 2$  см,  $h = 18$  см, прямой секции нет.

**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.

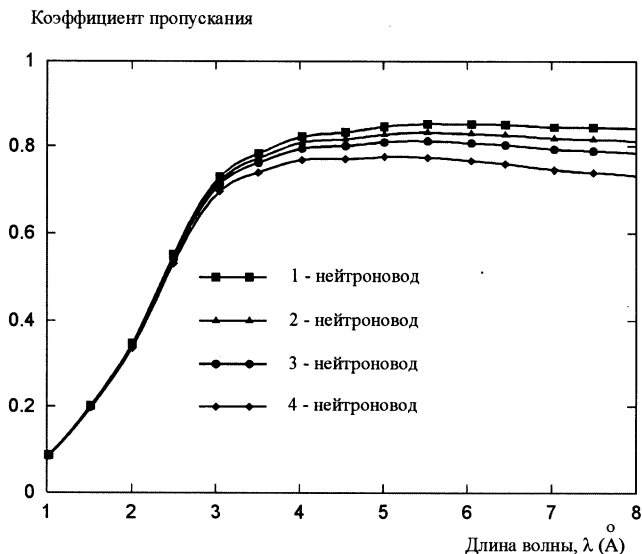
На рисунке 8 приведен расчет среднеквадратичного отклонения плотности потока на выходе данных нейтронородов. Данные на рис. 8 нормированы на среднее значение плотности потока нейтронов, рассчитанного для конкретной длины волны, и выражены в %.



**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

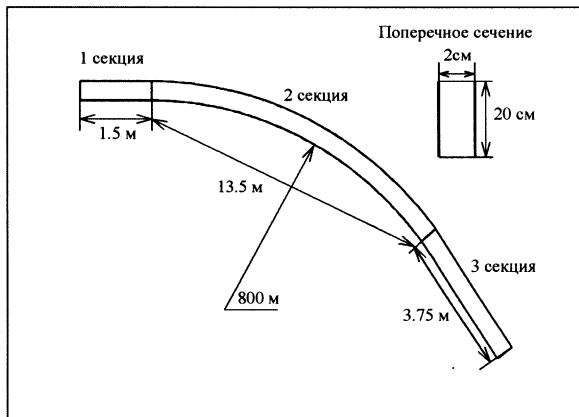
Из рисунка видно, что при заданном коэффициенте отражения потери в пропускной способности не слишком велики и могут рассматриваться как оправданные для увеличения степени однородности нейтронного пучка.

#### 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].

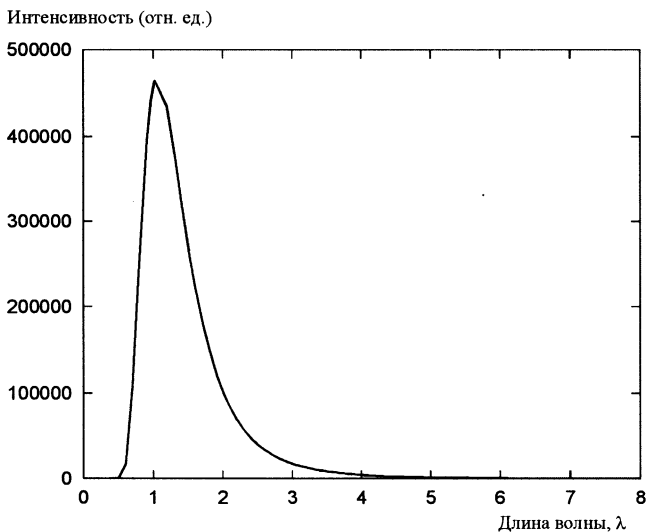
При этом нейтроновод состоит из 3 секций: 1 – прямая длиной 150 см; 2 – изогнутая длиной 1350 см с радиусом кривизны 800 м; 3 – прямая длиной 375 см. Схематически нейтроновод показан на рисунке 10. Коэффициент отражения нейтронов от боковых стенок нейтроновода принимался равным 0,98 (стекло FLOAT, покрытое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



**Рисунок 10.** Конструкция нейтроновода ДН-2

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

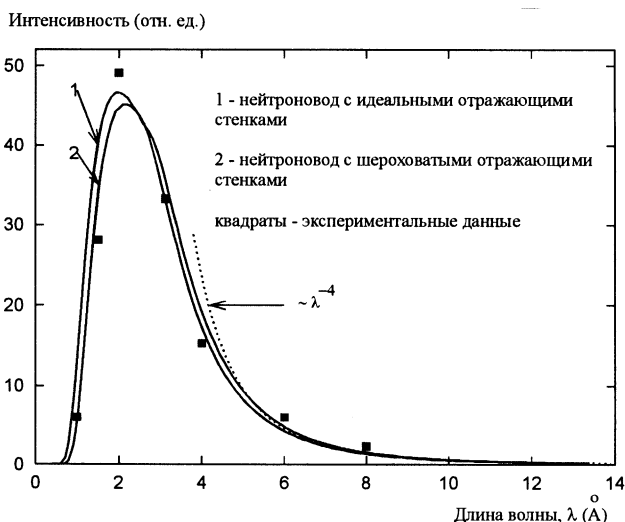
Измеренный на установке ЮМО спектр прямого пучка от водяного замедлителя реактора ИБР-2 представлен на рисунке 11.



**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 нейтронотвод. В соответствии с требованием к исходным данным программы mcguide-new, предположим, что интенсивность выражена в  $\left[ \frac{\text{нейтрон}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стерадиан}} \right]$ .

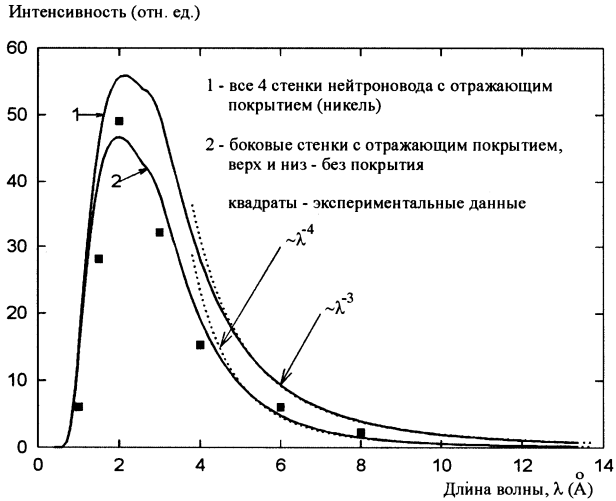
На рисунке 12 показаны результаты расчетов спектра нейтронов на выходе нейтронотвода. Кривая 1 рассчитана в предположении идеально гладких стенок нейтронотвода, а кривая 2 - в предположении шероховатых стенок с дисперсией шероховатости  $\langle \sigma \rangle = 10^{-3}$ . Квадраты соответствуют экспериментальным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



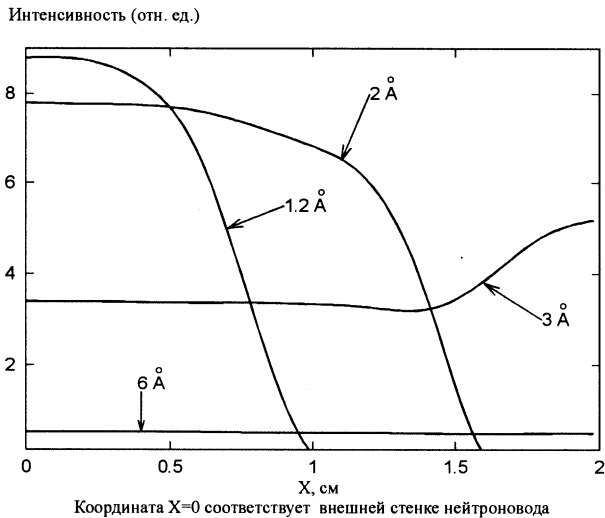
**Рисунок 12.** Расчет нейтронотвода ДН-2 с разным качеством отражающей поверхности

В вышеприведенных расчетах предполагалось, что нижняя и верхняя стенки нейтронотвода не отражают нейтроны. Если предположить, что верхняя и нижняя стенки нейтронотвода 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 нейтронотвода являются отражающими, спадание спектра в области больших длин волн следует закону  $\lambda^{-3}$ . В работе [7] отмечено, что экспериментальный спектр на выходе нейтронотвода ДН-2 в области больших длин волн подчиняется именно  $\lambda^{-3}$ , а не  $\lambda^{-4}$ , как следовало бы ожидать для



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

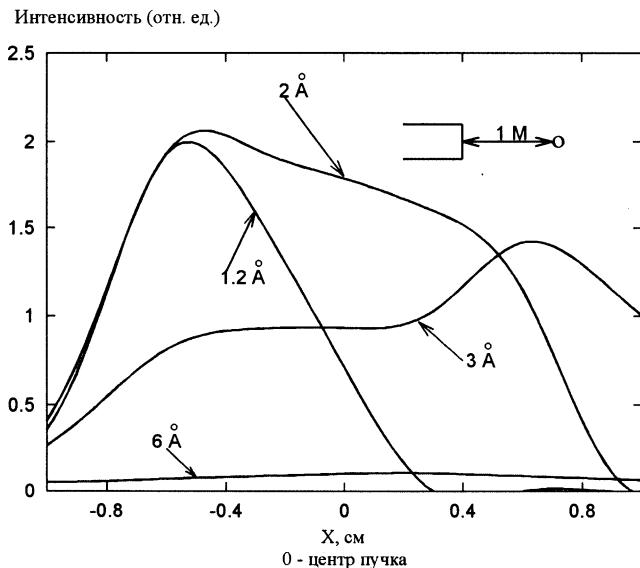


**Рисунок 14.** Зависимость интенсивности плотности потока нейтронов на выходе нейтронновода дифрактометра ДН-2 от горизонтальной координаты

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

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  $3 \text{ \AA}$  наблюдался в эксперименте, но не был как-либо интерпретирован. Расчеты показывают, что указанная особенность является следствием конструкции нейтроновода дифрактометра ДН-2.

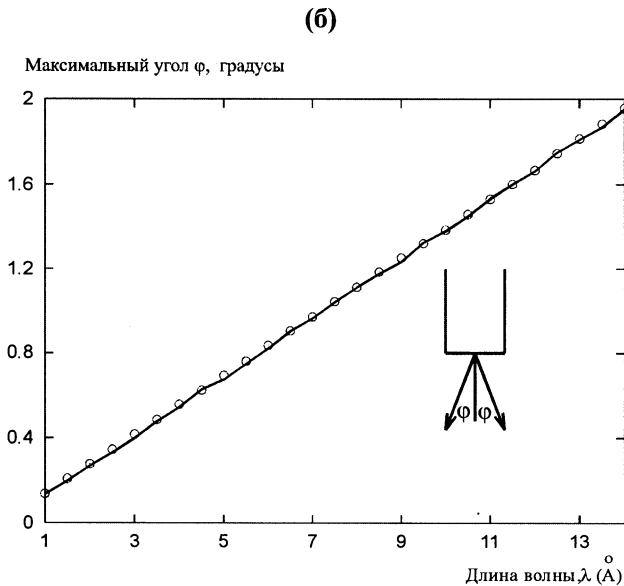
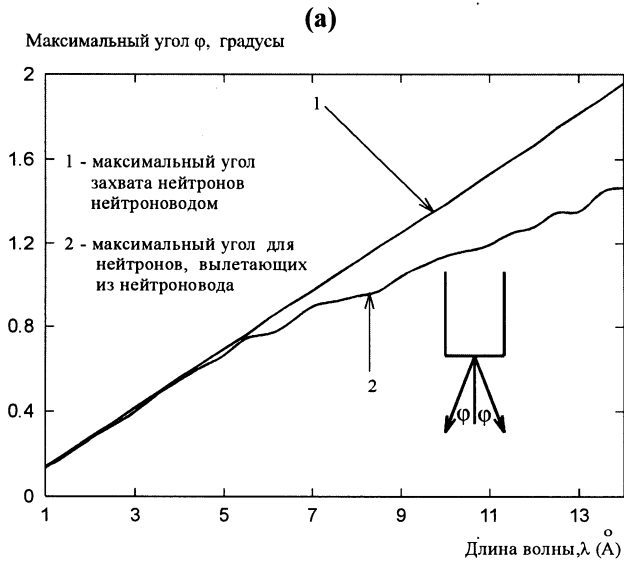


**Рисунок 15.** Зависимость интенсивности нейтронов от координаты X в горизонтальной плоскости на месте расположения образца

## 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  $\varphi$  - это **максимальный** угол между осью последней секции нейтроновода и направлением вектора скорости нейтронов, вылетающих из нейтроновода спектрометра ДН-2. Результаты приведены на рисунке 16.



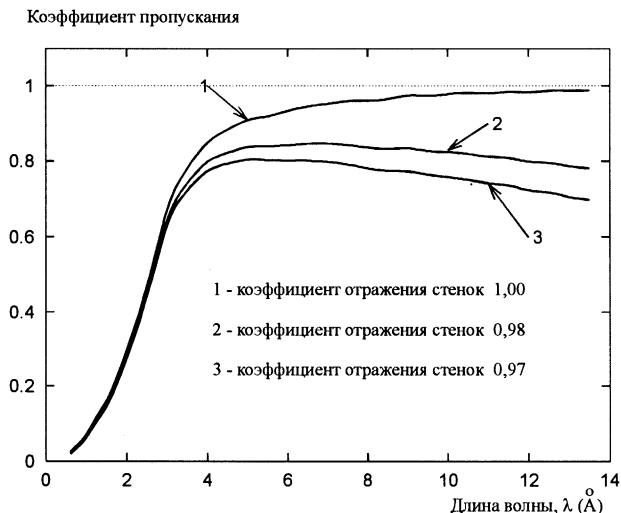


**Рисунок 16.** Угловое распределение нейтронного потока на выходе нейтроновода спектрометра ДН-2: (а) верхняя и нижняя стенки не отражают нейтроны; (б) все стенки отражающие, непрерывная линия – максимальный угол захвата нейтронов нейтроноводом, кружки – максимальный угол для нейтронов, вылетающих из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

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 экспериментально измеренными 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

Редактор Е.Ю.Шаталова. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 31.05.2000

Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 1,52

Тираж 320. Заказ 52053. Цена 1 р. 83 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
Дубна Московской области