

сообщения
Объединенного
Института
Ядерных
Исследований
Дубна

P3-85-285

В.В.Голиков, Е.Н.Кулагин, Ю.В.Никитенко

КАНАЛ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ
НА РЕАКТОРЕ ИБР-2

1985

Весьма малая энергия ультрахолодных нейтронов / $\approx 10^{-7}$ эВ / и связанная с этим такая особенность, как возможность удержания в ловушках, позволяет использовать их в ряде специфических экспериментов ^{/1/}. На созданном в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ импульсном реакторе на быстрых нейтронах ИБР-2 ^{/2/} введена в эксплуатацию первая очередь канала УХН, обеспечивающая получение и транспортировку УХН от замедлителя реактора до экспериментальных установок.

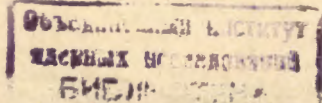
1. КОНСТРУКЦИЯ КАНАЛА

Канал УХН размещается на горизонтальном пучке № 3 реактора ИБР-2 /рис.1/. Нейтронотвод канала изготовлен из электрополированных труб из нержавеющей стали с внутренним диаметром 187 мм. Общая длина канала ~9,6 м. Наиболее близко расположенная к активной зоне реактора головная часть канала представляет собой прямолинейный отрезок длиной 3,2 м, далее нейтронотвод плавно изогнут с радиусом кривизны ~30 м. Изогнутая часть нейтронотвода позволяет вывести в экспериментальный зал не только УХН, но и медленные нейтроны со скоростями до 100 м/с. Для получения чистого пучка УХН в экспериментальном зале к каналу УХН подсоединяются угловые повороты из электрополированной нержавеющей стали или меди.

В головной части канала размещен конвертор-источник УХН, восстанавливающий низкоэнергетическую часть максвелловского спектра тепловых нейтронов, выходящих из водяного замедлителя реактора ИБР-2, которая теряется при прохождении нейтронов через 10-миллиметровый слой воздуха и стенку нейтронотвода. В качестве конвертора имеется возможность использовать воду, намораживаемую на холодную алюминиевую подложку.

Для охлаждения конвертора до температуры 18-20 К предусмотрена возможность использования газообразного холодного гелия. Головная часть канала УХН охлаждается проточной водой из системы водяного замедлителя ИБР-2. Канал № 3 в бетонной защите реактора имеет прямоугольный вид со сторонами 230 и 400 мм. Поскольку внешний диаметр нейтронотвода УХН равен 219 мм, часть отверстия в бетонной защите используется для подвода к конвертору холодного гелия, термопар и газообразного водорода.

Во избежание излишней активации в нерабочем состоянии канал УХН находится на расстоянии 3 м от активной зоны реактора в кольцевом коридоре. В это время пучок № 3 перекрыт защитным шибером



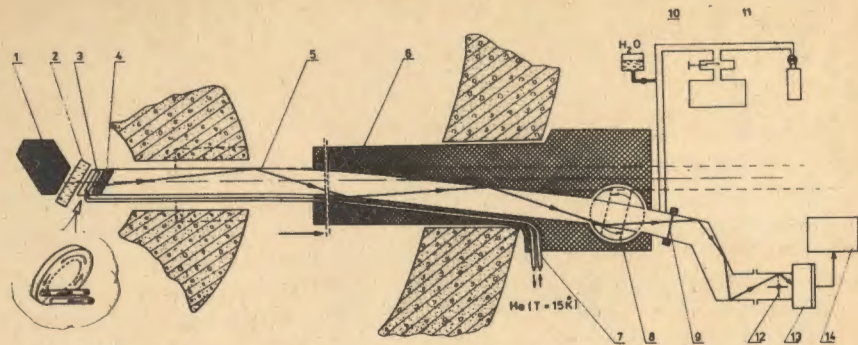


Рис. 1. Схема канала УХН. 1 - активная зона реактора; 2 - замедлитель; 3 - конвертор УХН; 4 - дополнительный замедлитель; 5 - изогнутый нейтронотвод; 6 - защита; 7 - криогенные трубопроводы; 8 - защитный шибер; 9 - вакуумная мембрана; 10 - вода для намораживания конвертора; 11 - система вакуумной безмасляной откачки; 12 - шторка; 13 - детектор; 14 - электронная аппаратура.

реактора. В рабочем режиме канал УХН перемещается почти вплотную к замедлителю реактора - расстояние между поверхностью замедлителя и головной частью канала УХН ~ 10 мм. Система перемещения канала УХН позволяет также выдвигать канал вместе с защитой полностью в экспериментальный зал для проведения крупных профилактических работ: в это время отверстие в биологической защите реактора закрывается защитной пробкой, а головная часть канала окружается дополнительной свинцовой защитой.

На конце изогнутого нейтронотвода в экспериментальном зале установлен вращающийся защитный шибер длиной ~ 1 м для уменьшения фона быстрых нейтронов и γ -лучей во время проведения персоналом наладочных работ на экспериментальных установках канала УХН.

Внутренняя полость нейтронотвода канала УХН герметично отделяется от присоединяемых к нему экспериментальных установок с помощью алюминиевой вакуумной мембраны толщиной ~ 100 мкм. Внутри нейтронотвода УХН поддерживается вакуум $\sim 10^{-6}$ Тор, обеспечиваемый сорбционными и магнитно-электроразрядными насосами безмасляной откачки.

В качестве детектора УХН используется пропорциональный счетчик на основе $^3\text{He}^{13}$. Эффективность детектора к УХН определяется пропусканием окна счетчика, изготовленного из алюминиевой фольги толщиной 100 мкм, и для изотропного потока нейтронов в интервале скоростей $0 \div 5,7$ м/с составляет $\approx 50\%$. Максимальная площадь детектора 130 см^2 . Для измерения фона детектор перекрывается мед-

ной шторкой толщиной 8 мкм. Накопление и первичная обработка информации проводится измерительным модулем на базе малой ЭВМ МЭРА-60 /4/.

2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛА

По технологическим соображениям /возможность быстрой смены конвертора УХН/ исследование основных характеристик канала и выбор конфигурации источника УХН проводились на канале, в котором головная часть длиной 3,2 м была изготовлена из электрополированной трубы из нержавеющей стали с внутренним диаметром 127 мм. При низкой мощности реактора / $W \leq 500$ кВт/ конвертором служил полиэтиленовый диск площадью 100 см^2 и толщиной 1 мм. При работе реактора на мощности 2 МВт вместо полиэтилена в качестве конвертора использовался магний площадью 130 см^2 и толщиной 5 мм.

При температуре конвертора T_k , равной температуре нейтронного спектра T_n , падающего на конвертор, поток УХН из полиэтилена $\Phi_{\text{УХН}}$ соответствует потоку в равновесном максвелловском спектре /5/:

$$\Phi_{\text{УХН}} = \frac{\Phi_T}{8} \left(\frac{E_{\text{ГР}}}{T_n} \right)^2 \quad /1/$$

где $E_{\text{ГР}}$ - граничная энергия полного отражения нейтронов от стенок нейтронотвода /для нержавеющей стали $E_{\text{ГР}} = 1,82 \cdot 10^{-7}$ эВ; для меди $E_{\text{ГР}} = 1,65 \cdot 10^{-7}$ эВ/, Φ_T - поток тепловых нейтронов, падающих на конвертор.

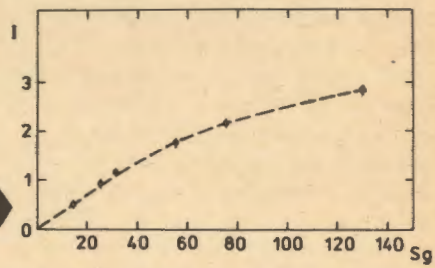
Определение потока тепловых нейтронов проводилось по активации золота как на поверхности водяного замедлителя реактора ИБР-2, так и непосредственно в месте расположения конвертора внутри нейтронотвода канала УХН. Средняя величина потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителя оказалась равной $2,2 \cdot 10^{12} \text{ н/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МВт}$; в районе конвертора $\sim 10^{12} \text{ н/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МВт}$. Связанное с конструктивными особенностями замедлителя ИБР-2 распределение потока тепловых нейтронов по поверхности замедлителя показано на рис.2.

Согласно /1/, поток УХН из полиэтиленового конвертора при $T_k = T_n = 300 \text{ К}$, $\Phi_{\text{УХН}} \approx 6,6 \text{ УХН/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МВт}$, в случае нейтронотвода из нержавеющей стали; и $\Phi_{\text{УХН}} \approx 5,4 \text{ УХН/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МВт}$, в случае нейтронотвода из меди. Из-за большого фона очень медленных нейтронов провести измерения потока УХН непосредственно на выходе изогнутого нейтронотвода не представилось возможным. Сведения о качестве нейтронотвода канала были получены при подсоединении к изогнутому нейтронотводу как 90-градусного уголкового поворота из нержавеющей стали с внутренним диаметром 187 мм и длиной ~ 1 м, так и трех 60-градусных поворотов из электрополированной меди с внутренним диаметром 200 мм и общей длиной $\sim 2,5$ м. Проведенные измерения показали, что пропускание УХН 90-градусным



Рис.2. Схема распределения потока тепловых нейтронов по поверхности замедлителя пучка № 3. За "1" принят поток, равный $2,2 \cdot 10^{12}$ н/см²·с·МВт.

Рис.3. Интенсивность УХН I /в от-носительных единицах/ в зависи-мости от площади детектора S_д /в см²/.



поворотом составляет 0,45, а трех 60-градусных поворотов ~ 0,56.

При мощности реактора W=100 кВт скорость счета УХН детекто-ром после трех 60-градусных поворотов составила 1,5 н/с при от-ношении эффекта к фону /детектор закрыт медной шторкой/ 20:1. Зависимость счета детектора от его площади показана на рис.3.

Учитывая, что эффективность детектора ~50%, можно заключить, что пропускание нейтроновода из нержавеющей стали, определяе-мое как отношение потока УХН на выходе к потоку УХН на входе, составляет ~0,075. Выкладывание всего канала УХН отрезками электрополированных медных труб привело к увеличению скорости счета УХН в 1,6 раз, что соответствует пропусканию нейтроновода ~0,145.

Распространение УХН по нейтроноводу обычно характеризуется в диффузионном приближении /6/ потоком

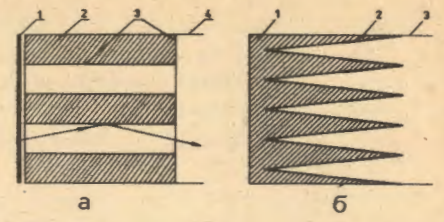
$$J(z) = -D \frac{dn(z)}{dz}, \quad /2/$$

где D - коэффициент диффузии; n(z) - плотность УХН в сечении ка-нала с координатой z, подчиняющаяся уравнению

$$\frac{d^2n(z)}{dz^2} = \frac{n(z)}{L_0^2}, \quad /3/$$

где $L_0 = \sqrt{DT}$ - диффузионная длина; $T = d/v\mu$ - время жизни УХН в нейтроноводе; d - средняя длина пробега между двумя соударе-ниями со стенкой канала; v - скорость УХН; μ - вероятность по-тери УХН при одном соударении.

Рис.4. Схемы дополнительных за-медлителей: а/ "дырочный": 1 - полиэтиленовый конвертор, 2 - полиэтилен, 3 - медная фольга, 4 - нейтроновод УХН; б/ гребенчатый: 1 - полиэтилен, 2 - мед-ная фольга, 3 - нейтроновод.



При решении уравнения /3/ используются граничные условия:

$$J_{\rightarrow}(0) = (1-\eta)J_0 + \eta J_{\leftarrow}(0), \quad J_{\leftarrow}(\ell) = \nu J_{\rightarrow}(\ell), \quad /4/$$

где $J_{\rightarrow}, J_{\leftarrow}$ - поток УХН от конвертора и к конвертору соответствен-но; J_0 - поток УХН в конверторе; η - коэффициент отражения УХН от начала нейтроновода /конвертора/; ν - коэффициент отражения УХН от конца нейтроновода; ℓ - длина нейтроновода.

Коэффициенты отражения η и ν берутся в следующем виде:

$$\eta = 1 - \frac{\mu_k S_k}{S_n}, \quad \nu = 1 - \frac{\mu_d S_d + \mu_0 S_0}{S_n}, \quad /5/$$

где S_n - сечение нейтроновода; S_k - площадь конвертора; μ_k - коэффициент поглощения УХН конвертором; S_d - площадь детектора; μ_d - коэффициент поглощения УХН детектором; S_0 и μ_0 - площадь и коэффициент поглощения УХН поглотителем /в случае его нали-чия вблизи детектора/.

Решая уравнение /3/, получаем следующее выражение для ско-рости счета УХН детектором /6/:

$$J_d(v) = \frac{J_0 \mu_d S_d (1 + \frac{2\eta}{1-\eta})}{(1-\eta) \left\{ \left(1 + \frac{\eta}{1-\eta} + \frac{\nu}{1-\nu}\right) \operatorname{ch} \frac{\ell}{L_0} + \frac{1}{2} \left[\frac{L_0 \nu}{2D} + \frac{2D}{L_0 \nu} \left(1 + \frac{2\eta}{1-\eta}\right) \left(1 + \frac{2\nu}{1-\nu}\right) \right] \operatorname{sh} \frac{\ell}{L_0} \right\}} \quad /6/$$

Выражение /6/ нужно усреднить по спектру УХН. В предположении максвелловского спектра скоростей УХН

$$J_d = \frac{4}{v_{гр}^4} \int_0^{v_{гр}} J_d(v) v^3 dv. \quad /7/$$

Для канала УХН в случае полиэтиленового конвертора и отсутствия поглотителя $\bar{\eta} = 0,5$ и $\bar{\nu} = 0,8$. Средние значения \bar{D} и \bar{L}_0 для мед-ного нейтроновода канала УХН были оценены из измерений зависи-мости счета УХН от площади детектора и поглотителя /полиэтиле-на/ и длины нейтроновода: $\bar{D} = 1,6$ м²/с; $\bar{L}_0 = 6,5$ м. Отсюда $\bar{T} = 26$ с, $\bar{\mu} \sim 1,4 \cdot 10^{-8}$. Подставляя указанные значения \bar{D} и \bar{L}_0 в /6/, получаем, что элементарная теория диффузии дает пропус-кание использованного нейтроновода ~0,20.

Как показали исследования на реакторе ИБР-30 /7/, поток тепло-вых нейтронов на конверторе может быть значительно увеличен пу-

тем постановки внутри нейтроновода дополнительного замедлителя. Измерения по выбору оптимальной конфигурации дополнительного замедлителя были проведены с двумя типами замедлителей: дырочным и гребенчатым /8/ /рис.4/. Дырочный замедлитель представлял собой цилиндр из полиэтилена площадью 100 см² и толщиной 100 мм. Соосно оси в цилиндре были сделаны несколько сквозных отверстий диаметром 20 мм, выложенных медью, для выхода УХН. Получено, что оптимум выхода УХН наблюдается при суммарной площади отверстий ~25÷30% от площади дополнительного замедлителя и в 2,3 раза превышает выход УХН из плоского конвертора.

Гребенчатый замедлитель длиной ~100 мм и угловым раствором 12°, устанавливаемый вместо плоского конвертора, был также изготовлен из полиэтилена /рис.4б/. Концы пилообразных выступов замедлителя были покрыты медной фольгой. Коэффициент увеличения выхода УХН гребенчатым конвертором по сравнению с плоским оказался равным 1,4.

3. СПЕКТР НЕЙТРОНОВ КАНАЛА УХН

Измерения спектров нейтронов канала УХН проводились с магнитным конвертором.

1. Спектр нейтронов на выходе изогнутого нейтроновода измерялся по методу времени пролета. В качестве детектора использовался тонкий пропорциональный счетчик площадью 130 см², заполненный газовой смесью с низким содержанием ³He /-0,25 Тор/, эффективность которого менялась по закону 1/v во всем интервале измеряемых энергий /для нейтронов со скоростью 60 м/с эффективность детектора составляла ~1%/. Для учета фона быстрых запаздывающих нейтронов детектор перекрывался кадмием толщиной 0,5 мм. Результаты измерений представлены на рис.5. Как и следовало ожидать, изогнутый нейтроновод резко уменьшает пропускание нейтронов со скоростями > 100 м/с.

2. Спектр УХН определялся на выходе подсоединенных к изогнутому нейтроноводу четырех угловых поворотов /одного прямоугольного и трех 60-градусных/ путем измерения зависимости счета УХН от высоты подъема детектора над уровнем нейтроновода. Необходимое положение детектора относительно оси канала достигалось изменением

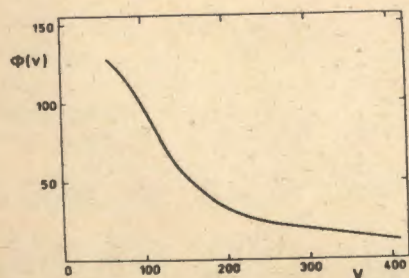


Рис.5. Форма спектра нейтронов на выходе изогнутого нейтроновода Φ(v) в единицах н/с · МВт, v - в м/с.

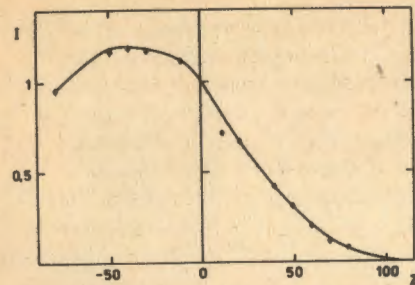


Рис.6. Интенсивность УХН I в зависимости от положения детектора по высоте z /см/. Сплошная кривая - расчет по формуле /8/ при максвелловском виде спектра УХН.

длины электрополированных медных цилиндров, соединяющих детектор с выходом канала. Из-за наличия в детекторе алюминиевого окна максимальное расстояние между детектором и осью канала не превышало 110 см. На рис.6 приведены экспериментальная и теоретическая зависимости скорости счета детектора J(z) от его положения z по вертикали от поверхности канала.

Для расчета теоретической кривой использовались следующие выражения:

$$J(z) = C \frac{v_M}{\sqrt{v_1^2 + 2gz}} \int_0^{v_M} \frac{v_z dv_z}{\sqrt{v_M^2 - v_z^2}} \int_0^{\sqrt{v_M^2 - v_z^2}} v_p \rho(v) dv_p; \quad z > \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g};$$

$$J(z) = C \left\{ \frac{v_2}{\sqrt{v_1^2 + 2gz}} \int_0^{v_2} \frac{v_z dv_z}{\sqrt{v_M^2 - v_z^2}} \int_0^{\sqrt{v_M^2 - v_z^2}} v_p \rho(v) dv_p + \right.$$

$$\left. + \int_{v_2}^{v_M} \frac{v_z dv_z}{\sqrt{v_2^2 - v_z^2}} \int_0^{\sqrt{v_M^2 - v_z^2}} v_p \rho(v) dv_p \right\}; \quad \frac{v_M^2 - v_3^2}{2g} < z < \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}; \quad /8/$$

$$J(z) = C \left\{ \alpha \left[\frac{v_2}{\sqrt{v_1^2 + 2gz}} \int_0^{v_2} \frac{v_z dv_z}{\sqrt{v_M^2 - v_z^2}} \int_0^{\sqrt{v_M^2 - v_z^2}} v_p \rho(v) dv_p + \int_{v_2}^{v_M} \frac{v_z dv_z}{\sqrt{v_2^2 - v_z^2}} \int_0^{\sqrt{v_M^2 - v_z^2}} v_p \rho(v) dv_p \right] + \right.$$

$$\left. (1-\alpha) \left[\frac{v_2}{\sqrt{v_1^2 + 2gz}} \int_0^{v_2} \frac{v_z dv_z}{\sqrt{v_3^2 - v_z^2 + 2gz}} \int_0^{\sqrt{v_3^2 - v_z^2 + 2gz}} v_p \rho(v) dv_p + \int_{v_2}^{v_M} \frac{v_z dv_z}{\sqrt{v_3^2 - v_z^2 + 2gz}} \int_0^{\sqrt{v_3^2 - v_z^2 + 2gz}} v_p \rho(v) dv_p \right] \right\}; \quad z < \frac{v_M^2 - v_3^2}{2g}.$$

где C - нормировочная константа, v_1 - граничная скорость материала окна детектора (3,21 м/с), v_2 - граничная скорость материала конвертора (3,37 м/с), v_3 - граничная скорость материала фланца детектора (6 м/с), v_m - максимальная скорость УХН в спектре, g - ускорение свободного падения, α - доля площади входного окна детектора по отношению к сечению нейтропровода, $1-\alpha$ - доля площади нейтропровода, приходящаяся на стальной фланец детектора, $\rho(v) = \rho_1(v)\rho_2(v)$, $\rho_1(v)$ - коэффициент прохождения УХН через границу конвертор - вакуум^{1/5}, $\rho_2(v)$ - коэффициент прохождения УХН входного окна детектора. Видно, что экспериментальные данные удовлетворительно описываются кривой, предполагающей спектр скоростей УХН максвелловским, обрезанным со стороны низких энергий, с $v_m = 5,67$ м/с, соответствующей значению граничной скорости меди. Для граничной скорости материала фланца детектора взято значение 5,77 м/с, что несколько меньше теоретического значения граничной скорости для нержавеющей стали ≈ 6 м/с, из которой изготовлен фланец детектора. Расхождение между v_3 и $v_{гр}$ для нержавеющей стали, возможно, связано с частичным вытеканием УХН через боковые стенки медной трубы, возникающим вследствие диффузного рассеяния УХН на поверхности.

Авторы признательны В.К.Игнатовичу за полезные обсуждения, В.Б.Дучицу, А.В.Русакову, О.М.Стрелковой за помощь при проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шапиро Ф.Л. ОИЯИ, РЗ-7135, Дубна, 1973.
2. Ананьев Б.Д. и др. ОИЯИ, РЗ-10888, Дубна, 1977; ПТЭ, 1977, № 5, с.17.
3. Стрелков А.В. ОИЯИ, З-5937, Дубна, 1971.
4. Голиков В.В. и др. ОИЯИ, Р13-83-215, Дубна, 1983.
5. Голиков В.В., Лушиков В.И., Шапиро Ф.Л. ЖЭТФ, 1972, 64, 1, 73.
6. Игнатович В.К., Терехов Г.И. ОИЯИ, Р4-10548, Дубна, 1977.
7. Голиков В.В., Лушиков В.И., Шапиро Ф.Л. Нейтронная физика, "Наукова думка", Киев, 1972, ч.1.
8. Гундорин Н.А., Назаров В.М. ОИЯИ, РЗ-80-721, Дубна, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 апреля 1985 года

Голиков В.В., Кулагин Е.Н., Никитенко Ю.В.
Канал ультрахолодных нейтронов
на реакторе ИБР-2

РЗ-85-285

Приводятся описание конструкции и результаты исследований основных характеристик канала ультрахолодных нейтронов /УХН/ на реакторе ИБР-2. Распространение УХН по каналу описывается теорией диффузии. Из измерений зависимости счета УХН от площади детектора и поглотителя и длины нейтропровода определены основные параметры медного нейтропровода канала УХН: коэффициент диффузии $1,6 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, диффузионная длина 6,5 м. При указанных параметрах элементарная теория диффузии дает пропускание использованного нейтропровода 0,2, что согласуется с экспериментальными данными. Определены спектры нейтронов, выходящих из различных участков канала.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Golikov V.V., Kulagin E.N., Nikitenko Yu.V.
UCN Channel at the IBR-2 Reactor

РЗ-85-285

The construction of UCN channel at the IBR-2 reactor and its principal characteristics are described. The propagation of UCN a long the channel is described in the frame of the diffusion theory. The main characteristics of the copper UCN guide-diffusion coefficient and diffusion length are found to be $1,6 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ and 6,5 m, respectively, from the dependence of UCN counting rate on the area of detector and adsorbed and neutron guide length. With the parameters reported the elementary diffusion theory admits an approx.0.20 transmission of the guide used which is in agreement with the experimental data. The neutron spectra from different parts of the guide are measured.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985