

НИИАР-14(660)

Центральный научно-исследовательский институт
информации и технико-экономических исследований
по атомной науке и технике

Ю.Ю.Косвинцев, В.И.Морозов, Г.И.Терехов

РАСПРОСТРАНЕНИЕ НЕЙТРОННОГО ГАЗА ПО НЕЙТРОНОВОДАМ



Москва-1985

УДК 530.125.5

Косвинцев Ю.Ю., Морозов В.И., Терехов Г.И. РАСПРОСТРАНЕНИЕ НЕЙТРОННОГО ГАЗА ПО НЕЙТРОНОВОДАМ: Препринт. НИИАР-14(660).- М.: ЦНИИАтоминформ, 1985.- 32 с.

Р е ф е р а т

Проведено систематическое исследование пропускания ультрахолодных нейтронов (УХН) цилиндрическими нейтронноводами из меди и стали при различном качестве обработки их внутренней поверхности. Установлено, что независимо от особенностей поверхности процесс распространения УХН по прямым нейтронноводам хорошо описывается диффузионным приближением. Исследовано влияние отражающих элементов в виде угловых поворотов, диафрагм и мембран на процесс распространения УХН по нейтронноводам. Разработан и экспериментально проверен метод учета сопротивления отражающих элементов на величину пропускания нейтроннопроводов. Получено общее соотношение для расчета пропускания сложных нейтроннопроводов с отражающими элементами. Проанализированы режимы работы транспортных нейтроннопроводов УХН, пути и возможности увеличения их пропускания. Описана установка для получения УХН на реакторе СМ-2 с горизонтальным транспортным нейтронноводом высокого пропускания.

Рис. II, табл. I, список лит. - 10 назв.

Научный редактор - канд. техн. наук А.В.Клинов



Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике (ЦНИИАтоминформ), 1985

Ю.К.Косвинцев, В.И.Морозов,
Г.И.Терехов

НИИАР-14(660)
УДК 530.125.5

Распространение нейтронного газа по нейтронноводам

Исследовано пропускание ультрахолодных нейтронов (УХН) цилиндрическими нейтронноводами из меди и нержавеющей стали различных конфигураций. Разработан и экспериментально проверен метод расчета пропускания сложных нейтронноводов в диффузионном приближении. Проанализированы режимы работы горизонтальных транспортных нейтронноводов, пути и возможности увеличения их пропускания. Описана установка для получения УХН на реакторе СМ-2 с горизонтальным транспортным нейтронноводом высокого пропускания.

Препринт, 1985

Yu.Yu.Kosvintsev, V.I.Morozov,
G.I.Terekhov

RIAR-14(660)
UDC 530.125.5

Neutron Gas Transmission along the Neutronguides

The ultra cold neutron transmission has been studied using the cylindrical neutronguides made of copper and stainless steel of various geometries. A method has been developed and experimentally tested for calculation in the diffusion approach of the complex geometry neutronguide transmission. The performance of the horizontal transport neutronguides and the feasibility of their transmitting ability increase were analyzed. The unit is described intended for producing the ultra cold neutrons at the SM-2 reactor with the horizontal neutronguide of the high transmitting capability.

Preprint, 1985

$$\frac{d^2n}{dz^2} - \frac{n}{L_0^2} = 0, \quad (I)$$

где $L_0 = \sqrt{D_0 \tau}$ - диффузионная длина.

Решение (I) можно представить как

$$n(z) = A \exp(-\frac{z}{L_0}) + B \exp(\frac{z}{L_0}).$$

Считая, что на вход нейтронновода длиной l падает поток УХН плотностью I_0 , постоянные A и B можно определить из граничных условий:

$$\left. \begin{aligned} \frac{n(0)v}{4} - \frac{1}{2} D_0 \frac{dn}{dz} \Big|_{z=0} &= I_0; \\ \frac{n(l)v}{4} + \frac{1}{2} D_0 \frac{dn}{dz} \Big|_{z=l} &= \beta_N \left[\frac{n(l)v}{4} - \frac{1}{2} D_0 \frac{dn}{dz} \Big|_{z=l} \right], \end{aligned} \right\}$$

где β_N - вероятность отражения УХН от выхода нейтронновода. Определив далее плотность выведенного потока I можно найти коэффициент пропускания нейтронновода по плотности потока:

$$K_N = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{\operatorname{ch}(\frac{l}{L_0}) + (1 - \beta_N) \left[\frac{L_0 v}{4 D_0} + \frac{D_0}{L_0 v} \frac{(1 + \beta_N)}{(1 - \beta_N)} \right] \operatorname{sh}(\frac{l}{L_0})}$$

и по потоку:

$$K = K_N (1 - \beta_N) = \frac{1}{\frac{1}{(1 - \beta_N)} \operatorname{ch}(\frac{l}{L_0}) + \left[\frac{L_0 v}{4 D_0} + \frac{D_0}{L_0 v} \frac{(1 + \beta_N)}{(1 - \beta_N)} \right] \operatorname{sh}(\frac{l}{L_0})}. \quad (2)$$

В работе [1] таким методом определяли пропускание медного нейтронновода, использовавшегося для выведения УХН из замедлителя (конвертор). Результаты расчета дали удовлетворительное согласие между выведенным и расчетным значениями потока этих нейтронов, что, казалось, свидетельствовало о правильном выборе закона отражения УХН (отражение абсолютно диффузное).

Однако в последующих работах эти же авторы [4,5] обнаружили, что пропускание медных электрополированных нейтро-

новопроводов более высокое, чем нейтронновода, описанного в работе [1], и характеризуется коэффициентом диффузии, который в 10-12 раз больше D_0 . Чтобы объяснить этот результат, необходимо было предположить, что отражение УХН от поверхности медных нейтроннопроводов в значительной степени зеркальное. При этом происходит эффективное увеличение коэффициента диффузии:

$$D = D_0 \frac{2-G}{G},$$

где G - вероятность диффузного отражения [1].

Если, как следовало из работы [5], $D \approx 10D_0$, то $G \approx 0,2$, т.е. вероятность диффузного отражения сравнительно мала. Это обстоятельство сразу поставило под вопрос правомерность использования диффузионного приближения в расчетах пропускания нейтроннопроводов. Как известно, условием применения диффузионного приближения является многократная смена направления движения нейтрона вдоль оси нейтронновода. При столь высокой зеркальности стенок ($G \approx 0,1$) это условие для реально используемых нейтроннопроводов, длиной $l \ll 100\tau$, не выполнялось достаточно строго. Кроме того, эти нейтроннопроводы - довольно сложные системы с рядом угловых поворотов и других, отражающих УХН, элементов. Если для таких систем картина распространения УХН довольно проста при чисто диффузном отражении нейтронов, то при зеркальном отражении она заметно усложняется. В данном случае было неясно, каким образом можно использовать диффузионное приближение. Видимо, поэтому дальнейшего развития при описании потока газа УХН оно не получило. Попытки использовать метод Монте-Карло для расчета пропускания нейтронов [2] также не получили широкого распространения из-за громоздкости вычислений даже в случае простых систем.

С развитием техники выведения УХН необходимость в методе расчета пропускания нейтроннопроводящих систем стала более ощутимой. Решение этого вопроса позволило бы изготавливать нейтроннопроводы с оптимальными характеристиками, получать данные по абсолютным значениям выхода УХН из конверторов, вести диагностику состояния нейтроннопроводов для выведения УХН из реакторов.

Цель настоящей работы - исследование процесса распространения УХН по нейтронопроводящим системам различного типа и разработка на основе полученных результатов практического метода расчета их пропускания.

I. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Основной целью проводимых исследований было установление связи между пропусканием нейтроноводов и такими их характеристиками, как размер, конфигурация, материал и способ обработки поверхности. При разработке методики измерений учитывалось, что корректное определение величины пропускания и последующая количественная интерпретация полученных данных на основе выбранной физической модели возможны при соблюдении следующих условий:

- . на вход нейтроновода необходимо подавать изотропный и контролируемый по величине поток УХН;

- . в эксперименте должна предусматриваться возможность изменения вероятности отражения УХН от выхода нейтроновода β_n ;

- . выходной поток необходимо регистрировать детектором, не отражающим УХН;

- . наряду с пропусканием необходимо измерять время хранения УХН в нейтроноводов для учета их потерь при ударах о стенки.

Схема установки, созданной в соответствии с этими требованиями, показана на рис. I. Ультрахолодные нейтроны с энергией $(0,7-1,7) \cdot 10^{-7}$ эВ поступали на вход исследованного нейтроновода из сферического сосуда, изотропирующего входной поток. К выходному патрубку сосуда через небольшое отверстие (1 см^2) и вертикальный ускорительный канал подсоединялся газовый пропорциональный детектор УХН с алюминиевым входным окном (площадь 60 см^2). Детектор являлся монитором входного потока УХН, поскольку величина его

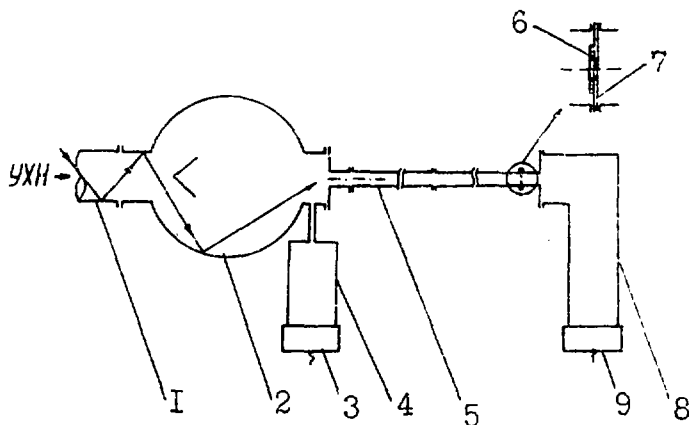


Рис.1. Схема установки для измерения пропускания УХН нейтронноводами: 1 - выходной патрубок; 2 - сферический изотропирующий сосуд; 3 - мониторирующий детектор; 4 - ускорительный канал мониторирующего детектора; 5 - исследуемый нейтронновод; 6 - полиэтиленовый диск; 7 - диафрагма; 8 - ускорительный канал детектора выходного потока; 9 - детектор выходного потока

не постоянна и зависит от пропускания исследуемого нейтронновода.

Нейтронноводы изготовлялись из медных и стальных труб (диаметр 25–36 мм) в виде прямых или изогнутых секций (длина 25–36 см); выходной поток УХН регистрировался детектором, не отражающим их. С этой целью к газсвому пропорциональному детектору с входным окном (площадь 60 см²) подключался вертикальный ускорительный канал с переходной камерой. На входе камеры была установлена диафрагма из нержавеющей стали с отверстием (радиус $r_0 = 2,5$ мм). Прошедшие через отверстие УХН регистрировались детектором почти полностью, поскольку вероятность их возвращения в нейтронновод пренебрежимо мала. Вероятность отражения УХН от выхода нейтронновода β_n изменялась установкой на диафрагму поли-

этиленовых дисков различного радиуса τ_n , игравших роль имитаторов экспериментальных устройств или нагрузки. При этом $\beta_n = 1 - (\tau_n/\tau)^2$, а выходной поток $I = K(\tau_n/\tau)^2$, где J - скорость счета детектора. Коэффициент пропускания УХН по плотности потока определяли как $K_n = J/J_0$, а коэффициент пропускания по потоку - как $K = J/J_0 (\tau_n/\tau)^2$, где J_0 - скорость счета детектора, подключенного переходной камерой непосредственно к выходному патрубку сферического сосуда.

Для измерения времени хранения УХН в нейтроноводе на входе и выходе устанавливали две диафрагмы из нержавеющей стали. Площадь S отверстий диафрагм была значительно меньше площади сечения нейтроновода. Ультрахолодные нейтроны, попадавшие в нейтроновод через диафрагму на входе, покидали его либо за счет потерь в стенках, либо через отверстия диафрагм. В предположении однородности плотности УХН по объему нейтроновода и изотропности по скорости время хранения определялось как

$$\tau = \frac{4J\Omega}{S\bar{v}(J_0' - 2J)'}$$

где Ω - объем нейтроновода; $\bar{v} = 4,7$ м/с - средняя скорость УХН; J_0' - скорость счета УХН, проходящих в нейтроновод через входную диафрагму, и J' - выходящих через выходную диафрагму.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПУСКАНИЯ ПРЯМЫХ НЕЙТРОНОВОДОВ

При большой вероятности зеркального отражения УХН применение диффузионного подхода к расчету пропускания даже простейших прямых нейтроноводов выглядело достаточно проблематично. На первом этапе работы нужно было установить возможность использования диффузионного приближения для расчета пропускания прямых нейтроноводов, которые по своим параметрам близки к применяемым на практике. Как правило, такие нейтроноводы изготавливаются из меди или из стали, имеют длину не более 100-150 см и поверхность, обработанную шлифовкой, травлением или электрополированием.

Для анализа результатов была принята упрощенная модель диффузно-зеркального отражения УХН, в которой предполагается, что нейтрон с вероятностью G отражается диффузно, а с вероятностью $(1-G)$ - зеркально. При такой модели выражение (2) для коэффициента пропускания по потоку можно представить как

$$K = \frac{1}{(1+R_H) \operatorname{ch}\left(\frac{\ell}{L}\right) + \left[\frac{L^2 V}{4D} + \frac{D}{LV}(1+2R_H)\right] \operatorname{sh}\left(\frac{\ell}{L}\right)}, \quad (3)$$

где $R_H = \frac{B_H}{1-B_H}$ - сопротивление, которое создает подключенное к выходу нейтронотода экспериментальное устройство (сопротивление нагрузки); $D = D_0 \frac{2-G}{G}$ - увеличенный (по сравнению с D_0) за счет зеркальных отражений коэффициент диффузии УХН; $L = \sqrt{D\tau}$.

При $\ell \gg L$ выражение (3) упрощается:

$$K = \frac{2e^{-\ell/L}}{(1+R_H) + \left[\frac{L^2 V}{4D} + \frac{D}{LV}(1+2R_H)\right]}. \quad (4)$$

Правомомерность использования приближения (3) можно было проверить систематическим исследованием зависимости K от отношения ℓ/L и R_H для нейтронотодов с различным качеством обработки поверхности. Соответствующие измерения были проведены для нейтронотодов из меди и нержавеющей стали.

Нейтронотоды из меди. На рис.2 показаны результаты измерений значений K нейтронотодов из меди. Рис.2,а соответствует нейтронотоду, поверхность которого была протравлена в H_3PO_4 при $80^\circ C$ в течение 3 ч. Пропускание оказалось сравнительно низким, так как после химического травления поверхность нейтронотода была заметно шероховата. Пропускание было несколько улучшено (см.рис.2,б) электрополированием нейтронотода в H_3PO_4 при $80^\circ C$ (плотность тока 10 A/дм^2 , время 3 мин). Максимальное пропускание для нейтронотодов из меди было достигнуто, когда нейтронотод электрополировался при температуре $30^\circ C$ в течение 10 мин при плотности тока 10 A/дм^2 (см. рис.2,в).

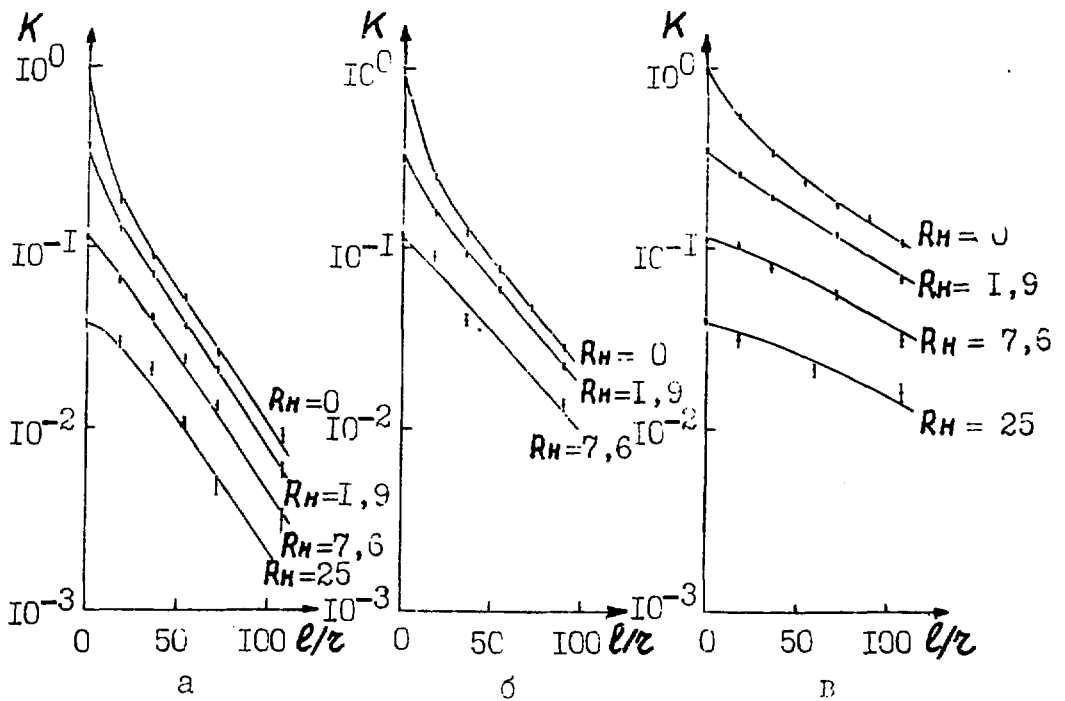


Рис.2. Зависимость K от l/τ и R_n для нейтроноводов из меди: а - нейтроновод, протравленный в H_3PO_4 при $80^\circ C$ в течение 3 ч: $L = (38,3 \pm 1,2)$ см; $\tau = (1,95 \pm 0,2)$ с; $D = (750 \pm 80)$ см²/с; $G = 0,7$; б - нейтроновод, электрополированный в H_3PO_4 при $80^\circ C$ в течение 3 мин: $L = (46 \pm 2)$ см; $\tau = (2,0 \pm 0,2)$ с; $D = (1060 \pm 140)$ см²/с; $G = 0,55$; в - нейтроновод, электрополированный в H_3PO_4 при $30^\circ C$ в течение 10 мин: $L = (95 \pm 5)$ см; $\tau = (2,8 \pm 0,3)$ с; $D = (3240 \pm 400)$ см²/с; $G = 0,22$

Из рис.2 видно, что при достаточно большой длине нейтроноводов K экспоненциально падает, причем характерная длина уменьшения K , не зависит от R_n . Наблюдаемый характер зависимости ($K \propto e^{-l/\tau}$) непосредственно формируется из соотношения (4). Приведены значения L , которые были определены методом наименьших квадратов из наклона экспериментальных кривых в области $l > L$. На рисунке указаны измеренные для каждого нейтроновода времена хранения τ и вычисленные из

известных L и τ значения D и G ; показаны также зависимости K от ℓ/τ и R_H , рассчитанные с помощью соотношения (3) и известных из эксперимента L , τ , D . Видно, что расчетные зависимости очень хорошо описывают ход экспериментальных точек во всем исследовавшемся диапазоне длин и сопротивлений нагрузки нейтронных труб.

Нейтронные трубы из нержавеющей стали. Аналогичные измерения были выполнены для нейтронных труб из нержавеющей стали. На рис. 3, а показана зависимость K для нейтронной трубы, обработанной электрополированием в H_2PO_4 при температуре $30^\circ C$ (плотность тока $10 A/dm^2$, время 10 мин). Более эффективным оказалось электрополирование при температуре $80^\circ C$ и плотности тока $10 A/dm^2$ в течение 10 мин (рис. 3, б). Как и в измерениях для нейтронных труб из меди, экспериментальные зависимости находились в хорошем согласии с рассчитанными на основе диффузионного приближения, хотя зеркальность стальных нейтронных труб была заметно выше ($G \approx 0,1$).

Наиболее высокой зеркальности стенок нейтронной трубы удалось добиться при последовательных операциях электрополирования и шлифовки абразивным порошком на основе Al_2O_3 . Электрополирование проводилось три-четыре раза (температура $80^\circ C$, плотность тока $20 A/dm^2$ в течение 10 мин) после каждой операции шлифовки с последовательно уменьшающимся зерном абразива. Результаты измерений показали (рис. 3, в), что даже при такой высокой зеркальности ($G = 0,04$) диффузионное приближение очень хорошо описывает экспериментальные кривые пропускания.

В целом полученные результаты показали, что расчет пропускания прямых нейтронных труб с помощью соотношения (3) в модели диффузно-зеркального отражения позволяет получать данные с точностью, вполне достаточной для инженерно-физических целей. Отражающие свойства поверхности нейтронных труб полностью описываются введением параметра G , который определяется качеством обработки поверхности и может изменяться в пределах $0,7-0,04$. Практический интерес представляют нейтронные трубы, поверхность которых характери-

зается значением $G \ll 0,2$. Относительная погрешность расчета пропускания для таких нейтронородов в интервале реально используемых длин $l = 0-150 \text{ з}$ не превышает 3-5 % при $R_H = 0$ и 7-10 % при $R_H = \infty$.

3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ УХН ПО НЕЙТРОНОВОДАМ С ОТРАЖАЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ В ДИФУЗИОННОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Нейтронороды для выведения из конверторов и для транспортировки УХН представляют собой довольно сложные системы, имеющие наряду с прямыми участками угловые повороты, разделительные вакуумные мембраны, диафрагмы и другие конструктивные элементы. Влияние их на процесс распространения УХН весьма существенно, поэтому возможность применения диффузионного приближения к реальным нейтронородам представляет большой практический интерес.

Одним из методов учета конструктивных элементов может быть следующий. Угловые повороты, диафрагмы, мембраны можно рассматривать как некоторые локальные элементы в прямом нейтронороде, которые частично отражают УХН. Распределение плотности нейтронов по длине нейтронорода при этом становится разрывным. Рассмотрим распространение УХН по прямому нейтронороду, в объеме которого имеется K локальных отражающих элементов, расположенных на расстоянии l_1, l_2, \dots, l_K от его входа (рис.4). Пусть эти элементы отражают УХН с вероятностью $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_K$ соответственно. Если потери УХН при ударах о стенки отсутствуют, то решение уравнения диффузии $\frac{d^2 n}{dz^2} = 0$ будет следующим:

$$\left. \begin{aligned} n_0(z) &= \nu_0 - \alpha z && \text{при } 0 < z < l_1 \\ n_1(z) &= \nu_1 - \alpha z && \text{при } l_1 < z < l_2 \\ \dots & \dots && \dots \\ n_K(z) &= \nu_K - \alpha z && \text{при } l_K < z < l \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

При $R_H = 0$ граничные условия запишем как

$$\left. \begin{aligned} \frac{n_0(0)v}{4} - \frac{1}{2} D \frac{dn_0}{dz} \Big|_{z=0} &= I_0 \\ \frac{n_K(l)v}{4} + \frac{1}{2} D \frac{dn_K}{dz} \Big|_{z=l} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

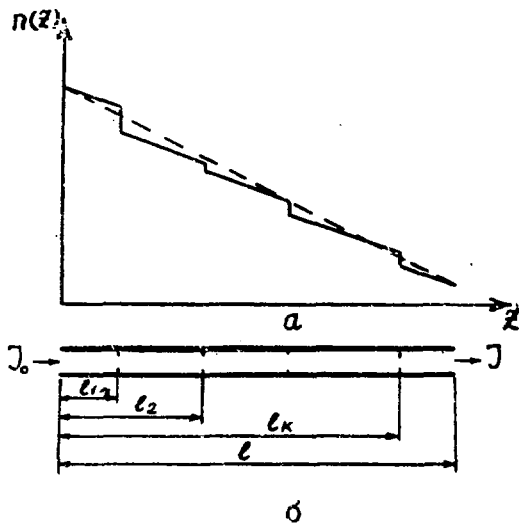


Рис.4. К расчету пропускания нейтронного канала с отражающими элементами: а - распределение плотности нейтронов $n(z)$ по длине нейтронного канала; б - схема нейтронного канала.

а с учетом соотношений (5)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\beta_0 v}{4} + \frac{1}{2} Da &= I_0; \\ (\beta_k - a l_k) v - \frac{1}{2} Da &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Из условия постоянства потока по длине нейтронного канала следует:

$$\left. \begin{aligned} & \left[\frac{(\beta_0 - a l_1) v}{4} + \frac{1}{2} Da \right] (1 - \beta_1) - \left[\frac{(\beta_1 - a l_1) v}{4} - \frac{1}{2} Da \right] (1 - \beta_1) = Da; \\ & \left[\frac{(\beta_1 - a l_2) v}{4} + \frac{1}{2} Da \right] (1 - \beta_2) - \left[\frac{(\beta_2 - a l_2) v}{4} - \frac{1}{2} Da \right] (1 - \beta_2) = Da; \\ & \dots \dots \dots \\ & \left[\frac{(\beta_{k-1} - a l_k) v}{4} + \frac{1}{2} Da \right] (1 - \beta_k) - \left[\frac{(\beta_k - a l_k) v}{4} - \frac{1}{2} Da \right] (1 - \beta_k) = Da. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Система уравнений (7) легко упрощается:

$$\left. \begin{aligned} \beta_0 - \beta_1 &= \frac{4Da\beta_1}{v(1-\beta_1)}; \\ \beta_1 - \beta_2 &= \frac{4Da\beta_2}{v(1-\beta_2)}; \\ \dots \dots \dots \\ \beta_{k-1} - \beta_k &= \frac{4Da\beta_k}{v(1-\beta_k)}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Складывая левую и правую части уравнений (8) почленно, получаем

$$v_0 - v_K = \frac{4Da}{v} \sum_{i=1}^K \frac{\beta_i}{1-\beta_i}. \quad (9)$$

Совместное решение уравнений (6) и (9) приводит к следующему выражению для потока УХН на выходе нейтроновода:

$$I = Da = \frac{I_0}{1 + \frac{vV}{4D} + \sum_{i=1}^K \frac{\beta_i}{1-\beta_i}},$$

из которого находится коэффициент пропускания по потоку K , совпадающий при $R_n = 0$ с K_n :

$$K = \frac{1}{1 + \frac{vV}{4D} + \sum_{i=1}^K \frac{\beta_i}{1-\beta_i}}. \quad (10)$$

Из выражения (10) видно, что, когда потери в стенках отсутствуют, пропускание не зависит от положения отражающих элементов в нейтроноводе и определяется только их суммарным сопротивлением $R = \sum_{i=1}^K \frac{\beta_i}{1-\beta_i}$. Если на выход нейтроновода подключена нагрузка в виде какого-то экспериментального устройства, то пропускание по потоку и плотности потока будет определяться как

$$K = \frac{1}{1 + \frac{vV}{4D} + R + R_n}; \quad (11)$$

$$K_n = \frac{1 + R_n}{1 + \frac{vV}{4D} + R + R_n}.$$

Допустим теперь, что УХН теряются при столкновениях со стенками нейтроновода. В этом случае прямое решение диффузионной задачи для нейтроновода с произвольным числом отражающих элементов представляет значительные математические трудности. Однако возможен следующий приближенный метод расчета пропускания. Наличие отражающих элементов, уменьшающих пропускание прямого нейтроновода, можно трактовать как эффективное уменьшение коэффициента диффузии D в прямом нейтроноводе. В данном случае соотношение (11) можно представить как

$$K = \frac{\gamma}{1 + \frac{eV}{4D_{эф}} + R_H}, \quad (12)$$

где

$$D_{эф} = D \left(1 + \frac{4DR}{eV}\right)^{-1}.$$

Очевидно, что введение $D_{эф}$ эквивалентно замене разрывного распределения плотности УХН в нейтронОВОде (см. рис.4, сплошная линия) непрерывным (см. рис.4, пунктир). Истинное распределение будет тем ближе к непрерывному, чем больше элементов в нейтронОВОде и чем меньше их суммарное сопротивление по сравнению с величиной $eV/4D$. Введя эффективную диффузионную длину $L_{эф} = \sqrt{D_{эф}\tau}$ и используя соотношение (3), получаем

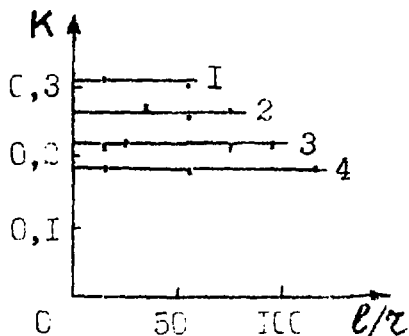
$$K = \left\{ (1 + R_H) \operatorname{ch} \left(\frac{L}{L_{эф}} \right) + \left[\frac{L_{эф}V}{4D_{эф}} + \frac{D_{эф}(1 + 2R_H)}{L_{эф}} \right] \operatorname{sh} \left(\frac{L}{L_{эф}} \right) \right\}^{-1}. \quad (13)$$

Соотношение (13) имеет приближенный характер, и возможность его использования можно было определить только экспериментально. Для этой цели необходимо было исследовать пропускание прямых нейтронОВОдов с отражающими элементами, сопротивление которых заведомо известно. Такими элементами являются диафрагмы, сопротивление которых ($R = \frac{\tau_d}{\tau_0} - 1$) не зависит ни от скорости УХН, ни от их углового распределения (τ_d - радиус отверстия).

Проверка соотношения (13) была проведена на нейтронОВОдах из нержавеющей стали, состоявших из отрезков прямых труб (диаметр 32 мм и длина 16-32 см). По качеству поверхности ($G = 0,09$) нейтронОВОды были близки к обычно используемым в практической работе с УХН ($L = (200 \pm 5)$ см; $D = (10000 \pm 1500)$ см²/с; $\tau = (4,0 \pm 0,35)$ с). Между отдельными секциями нейтронОВОдов устанавливались стальные тонкостенные диафрагмы с τ_d , равным 3, 4, 7 и 12 мм.

На рис.5 показаны результаты измерений K для нейтронОВОдов различной длины, в которые устанавливалась одна диафрагма, создававшая сопротивление $R_H = 0,78$. Измерения проводились при $R_H = 0$ для различных положений диафрагмы в нейтронОВОдах (L_1 - расстояние между диафрагмой и входом в нейтронОВОд).

В приближении (I3) коэффициент K не должен зависеть от положения диафрагмы в нейтронноводе. Из рис.5 видно, что в пределах ошибки измерений это — действительно так и рассчитанные с помощью соотношения (I3) значения K (сплошные горизонтальные линии) хорошо согласуются с экспериментальными.



На рис.6 показана зависимость K для нейтронновода длиной 95 τ от суммарного сопротивления введенных диафрагм. В данном случае использовался набор диафрагм, каждая из которых создавала сопротивление 0,78 или 4,22. Зависимость была измерена для двух, заметно отличающихся, сопротивлений нагрузки ($R_n = 0$ и $R_n = 3I$). Расположение диафрагм в нейтронноводе схематично показано на рис.6, в (внизу, под соответствующими экспериментальными точками). Сплошными линиями изображены значения K , рассчитанные из соотношения

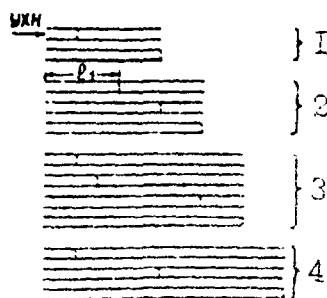
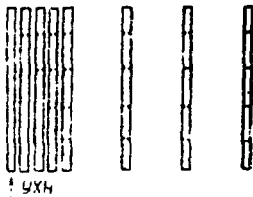
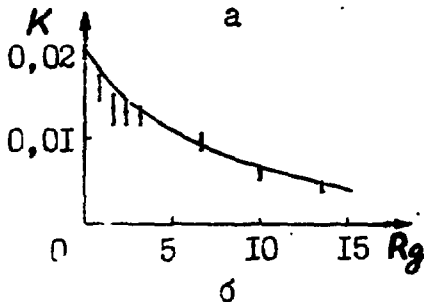
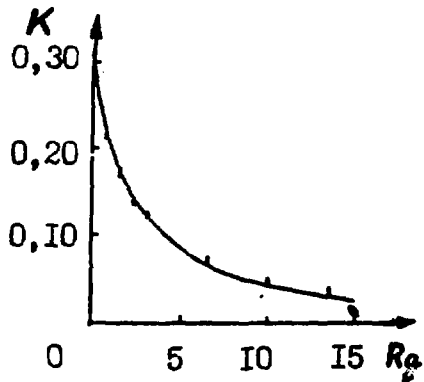


Рис.5. Зависимость K от l/τ — расстояния между диафрагмой и элементом в нейтронноводе, l равно: 1 — 55 τ ; 2 — 75 τ ; 3 — 95 τ ; 4 — 115 τ .

(I3). Приведенные результаты свидетельствуют, что соотношение (I3) описывает K для нейтроннопроводов с отражающими элементами (погрешность не более 10–15 %) в широком диапазоне изменения нагрузки. Таким образом, предложенный метод расчета пропускания вполне может быть использован для инженерно-физических разработок и проектирования нейтроннопроводов УКН. Однако необходимо отметить, что при проведении расчетов с помощью соотношения (I3) существуют определенные ограничения на минимальные расстояния между отражающими элементами. Изначительно, чтобы они были не меньше средней длины пробега $l_{\text{ср}}$ между диффузными соударениями ($\frac{2\tau(2-G)}{G}$).

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПУСКАНИЯ НЕЙТРОНОВОДОВ С УГЛОВЫМИ ПОВОРОТАМИ И РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫМИ МЕМБРАНАМИ



в

Рис. 6. Зависимость K от суммарного сопротивления диафрагм R_g , введенных в нейтроновод: а - $R_H = 0$; б - $R_H = 3I$; в - расположение диафрагм в нейтроновом

Совершенно необходимыми конструктивными элементами в нейтроноводах являются угловые повороты, образуемые стыком двух прямых участков. В работах [6,7] показано, что поворот приводит к возмущению углового распределения потока нейтронов, распространяющихся по нейтроноводу. При конечной вероятности зеркального отражения УХН поворот отбрасывает назад часть падающих на него нейтронов, т.е. увеличивает сопротивление нейтроновода. Тем не менее из данных работ [6,7] было неясно, можно ли рассматривать угловой поворот как локальный отражающий элемент с определенным сопротивлением R_α . Чтобы убедиться в этом, необходимо было исследовать для нейтроновода с поворотом зависимость K от величины и положения поворота на нейтроновоме.

Результаты измерений показаны на рис.7, где изображена зависимость K для нейтроновода с $\ell = 95 \text{ г}$ и угловым поворотом $\alpha = 90^\circ$ от ℓ_2

(расстояние между входом в нейтроновод и поворотом). По качеству поверхности нейтроновод был идентичен тем, которые

использовались в опытах с диафрагмами ($G = 0,09$, $\tau = 4^{+0,35}$ с). Из полученных данных видно, что при заданном значении R_H пропускание в пределах ошибки измерений не зависит от положения поворота. В то же время вся система экспериментальных точек хорошо описывается выражением (13) с $D_{sp} = \frac{D}{1 + R_H D / R_{01}}$ где $R_{01} = 1,9$ (сплошные горизонтальные линии). Таким образом, угловой поворот можно рассматривать как отражающий элемент, обладающий вполне определенным сопротивлением.

Очевидно, что диаметр R_{01} , как и вероятность отражения β_{01} , должен зависеть не только от угла поворота α , но и от параметра G для поверхности прямых участков, образующих поворот. При $G = 1$ значение $\beta_{01}(\alpha, G)$ равно нулю. Естественно предположить, что в первом приближении $\beta_{01}(\alpha, G) = (1 - G)f(\alpha)$, где $f(\alpha)$ - некоторая функция угла поворота. В целях определения конкретного вида $\beta_{01}(\alpha, G)$ было проведено измерение K для ряда нейтронных поворотов $0-90^\circ$ и внутреннюю поверхность различного качества ($G = 0,09-0,70$). Значения $\beta_{01}(\alpha, G)$ определяли из соотношения (13) по дополнительному сопротивлению, которое повороты вносили в прямой нейтронный провод. На рис. 8, а даны результаты измерений $\beta_{01}(\alpha, G)$ для поворотов с $\alpha = 45^\circ$ и

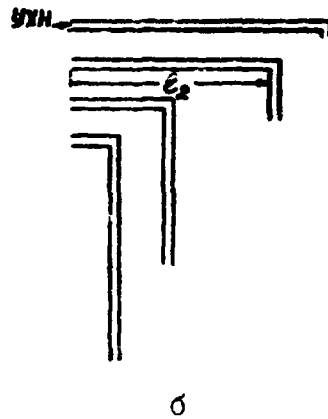
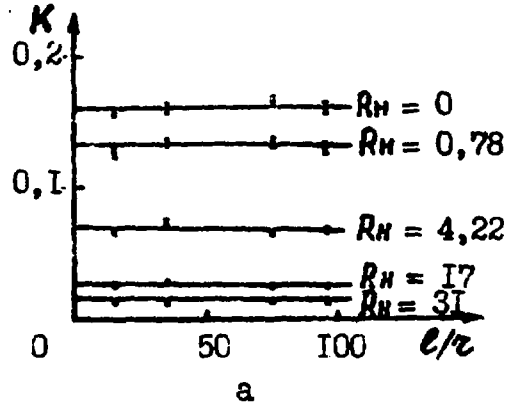


Рис. 7. Зависимость K от l_2 - расстояния между угловым поворотом и входом в нейтронный провод: а - экспериментальные результаты; б - расположение угловых поворотов

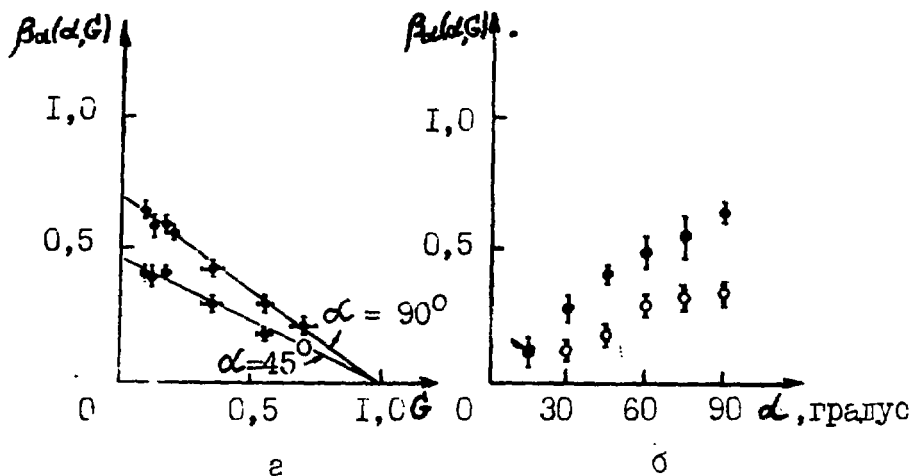


Рис. 8. Зависимость β_d от d и G : а - зависимость β_d от G при d , равном 45° и 90° ; б - зависимость β_d от d при $G = 0,095$ (светлые точки) и $G = 0,55$ (затемненные точки)

$\alpha = 90^\circ$, подтверждающие предположение, что $\beta(d, G) \propto (1 - G)$. Угловая зависимость $\beta_d(d, G)$ для нейтронпроводов с $G = 0,095$ и $G = 0,55$ показана на рис. 8, б.

Результаты измерений $\beta_d(d, G)$ позволили проверить предложенный метод расчета K применительно к сложным нейтронпроводам с несколькими угловыми поворотами. В таблице приведены результаты измерений и расчета величины K для нейтронпровода длиной 160τ при $R_H = 0$ ($G = 0,095$ и $\tau = 4 \pm 0,35$ с). Измерения и расчеты проводили для нескольких конфигураций нейтронпровода, отличавшихся количеством и углом поворотов. Результаты измерений и расчета совпали в пределах ошибки измерений (10%), что еще раз подтверждает практическую пригодность метода для расчета нейтронпроводов с угловыми поворотами.

Помимо поворотов, необходимым элементом транспортных нейтронпроводов являются разделительные мембраны, предназначенные для вакуумной развязки отдельных секций нейтронпроводов. Как правило, в нейтронпровод устанавливается одна-две мембраны из алюминия, имеющего низкую граничную скорость ($V_{гр} = 3,2$ м/с). Вероятность отражения УХН от мембраны β_m зави-

Коэффициент пропускания нейтронотода
с угловыми поворотами

Количество поворотов	Угол поворота, градус	Значение K	
		расчетное	экспериментальное
1	На 90	0,097	$0,10 \pm 0,01$
2	На 90	0,064	$0,06 \pm 0,005$
1	На 45	0,053	$0,055 \pm 0,004$
2	На 90		
2	На 45	0,045	$0,041 \pm 0,004$
2	На 90		
Без поворотов	-	0,166	$0,17 \pm 0,015$

сит как от скорости нейтронов, так и от их углового распределения. В связи с этим мембраны дают вклад в формирование спектра потока УХН на выходе транспортного нейтронотода.

При изотропном угловом распределении падающего на мембрану потока УХН

$$\beta_m = \begin{cases} 1 & \text{при } v < v_{гр}; \\ \frac{v_{гр}^2}{v^2} & \text{при } v > v_{гр}. \end{cases}$$

В целях определения влияния мембран на пропускание были измерены значения K для нейтронотода, в различные участки которого устанавливалась алюминиевая мембрана (толщина 30 мкм). Используемый для измерений нейтронотод имел следующие параметры: $\ell = 160\text{ см}$, $L = (200 \pm 5)\text{ см}$, $D = (10000 \pm 1500)\text{ см}^2/\text{с}$, $\tau = (4 \pm 0,45)\text{ с}$, $G = 0,095$. Результаты измерений показали, что при $R_m > 3$ значение K (погрешность 5%) не зависит от положения мембраны в нейтронотоде. Соотношение (13) с погрешностью не более 10% определяло K , если вероятность отражения от мембраны находилась как $\beta_m = \frac{v_{гр}^2}{v^2}$, где $\bar{v} = 4,7\text{ м/с}$ (средняя скорость использовавшихся в эксперименте УХН).

В целом результаты проведенной работы показали возможность применения диффузионного приближения для расчета пропускания транспортных нейтронных труб, которые используются в практической работе с УХН. Отражающие элементы (диафрагмы, угловые повороты, мембраны) являются типовыми для таких нейтронных труб. В принципе можно применять данный метод расчета пропускания и для других конструктивных деталей нейтронных труб, если их рассматривать как локальные отражающие элементы. Для этого необходимо убедиться, что пропускание не зависит от положения детали в нейтронной трубе и она может быть охарактеризована вполне определенным сопротивлением, не зависящим от сопротивления нагрузки.

5. РЕЖИМ РАБОТЫ НЕЙТРОННЫХ ТРУБ ДЛЯ ВЫВЕДЕНИЯ УХН. ПУТИ И ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ИХ ПРОПУСКАНИЯ

Для горизонтальных нейтронных труб, выводящих УХН из конверторов, основной характеристикой будет не K , а K_n , определяющая коэффициент пропускания нейтронной трубы по плотности выводимого потока УХН, т.е. потока, падающего на экспериментальное устройство, подключенное к выходу нейтронной трубы. Из соотношения (13) следует

$$K_n = \frac{1}{ch\left(\frac{l}{L_{эф}}\right) + \left[\frac{L_{эф}V}{4D_{эф}(1+R_n)} + \frac{D_{эф}(1+2R_n)}{L_{эф}(1+R_n)} \right] sh\left(\frac{l}{L_{эф}}\right)}, \quad (14)$$

где $D_{эф}$ находится по соотношению (12) через D и суммарное сопротивление R всех отражающих элементов, имеющих в нейтронной трубе.

Плотность выводимого потока УХН определяется характером устройства на выходе нейтронной трубы, т.е. сопротивлением нагрузки. В зависимости от этой величины можно выделить два предельных режима работы транспортного нейтронного трубопровода: проточный и накопительный. В проточном режиме все нейтроны, достигшие выхода нейтронного трубопровода, полностью поглощаются экспериментальным устройством. При этом $\beta_n = 0, R_n = 0$ и

$$K_H = \frac{1}{\operatorname{ch}\left(\frac{L}{L_{\text{эф}}}\right) + \left[\frac{L_{\text{эф}} V}{4D_{\text{эф}}} + \frac{D_{\text{эф}}}{L_{\text{эф}} V} \right] \operatorname{sh}\left(\frac{L}{L_{\text{эф}}}\right)} \quad (15)$$

В накопительном режиме все нейтроны, достигшие выхода, отражаются экспериментальным устройством назад, в нейтронород. В этом случае $\beta_H = 1$, $R_H = \infty$ и

$$K_H = \frac{1}{\operatorname{ch}\left(\frac{L}{L_{\text{эф}}}\right) + \frac{2D_{\text{эф}}}{L_{\text{эф}} V} \operatorname{sh}\left(\frac{L}{L_{\text{эф}}}\right)} \quad (16)$$

Из соотношений (15) и (16) видно, что в накопительном режиме плотность выводимого потока УХН всегда выше, чем в проточном. Зависимость плотности выводимого потока УХН от R_H , называемая нагрузочной кривой, определяет экспериментальные возможности нейтронорода.

Нейтронороды для выведения УХН обычно редко используются в чисто проточном режиме работы. Для основной части опытов с УХН характерным является режим, близкий к накопительному. В экспериментах по наполнению нейтронным газом сосудов и ловушек плотность потока в этом режиме также является определяющей. При наполнении сосуда нейтронами в начальный момент, когда сосуд еще пуст, нейтронород работает в проточном режиме. По мере увеличения числа УХН в сосуде все большая часть их выходит назад, в нейтронород.

Число УХН в сосуде стабилизируется, когда потоки нейтронов, идущих в сосуд и обратно, сравниваются по величине. Нейтронород при этом переходит в накопительный режим, а плотность УХН в сосуде достигает максимального значения

$\frac{4I_0 K_H}{V}$, если время хранения нейтронов в сосуде достаточно велико.

Рассмотрим возможности увеличения пропускания транспортных нейтронородов, которые применяются для выведения УХН из конверторов. Традиционный материал для изготовления нейтронородов — выпускаемые отечественной промышленностью электрополированные трубы из нержавеющей стали (диаметр 90 мм). Исследование пропускания таких труб показало, что по качеству поверхности они характеризуются параметром G , колеб-

лющимся в пределах 0,1-0,2 и коэффициентом потерь $\mu = 2 \cdot 10^{-3}$ при $v = 4,7$ м/с. Дополнительными операциями шлифовки и электрополирования значение G можно понизить до 0,04, однако дальнейшее повышение зеркальности стенок труб представляет большие трудности.

На рис.9 показаны зависимости K_H от l/r , рассчитанные для этих труб с помощью соотношений (15) и (16) при G , равном 0,04; 0,1; 0,2, для УХН со скоростью 4,7 м/с.

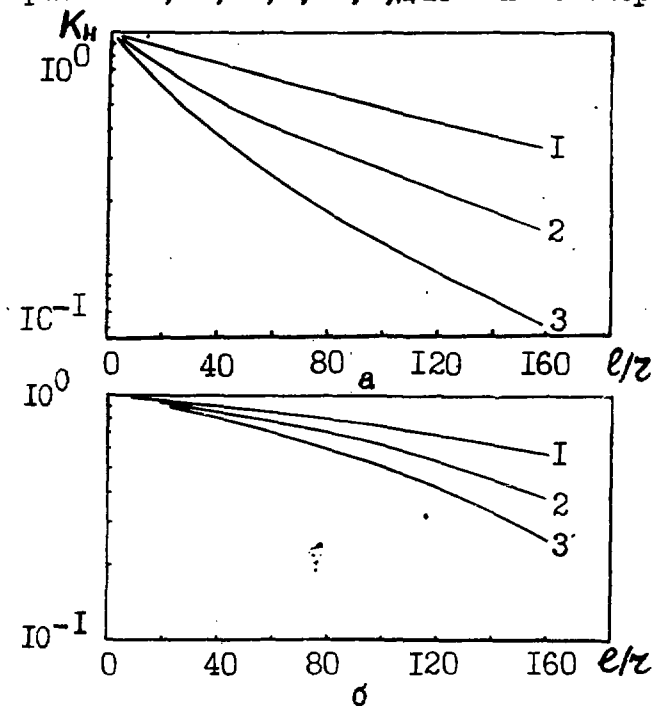


Рис.9. Зависимость K_H для промышленных электрополированных труб от l/r при различных G : а - проточный режим; б - накопительный: 1 - $G = 0,04$; 2 - $G = 0,1$; 3 - $G = 0,2$

На рис.9,а показано, что в проточном режиме для прямого нейтроновода, длиной 7 м (150 τ), при максимально достигнутой зеркальности стенок ($G = 0,04$) значение $K_H = 0,35$. Таким образом, если идти по пути дальнейшего повышения зеркальности стенок, то в принципе для прямого нейтроновода можно увеличить K_H еще в 2-2,5 раза. Однако транспортный нейтроновод всегда имеет отражающие элементы, обладающие суммарным сопротивлением R . Из соотношения (15) следует, что при $h_{эф} > l$ $K_H \approx (1 + \frac{lv}{4D} + \frac{l}{2v} + R)^{-1}$, т.е., если бы даже удалось увеличением зеркальности стенок значение $lv/4D$ понизить до

Реализация таких нейтроноводов позволила бы сохранить плотность нейтронного газа при его передаче на расстояние уже не десятки, а сотни метров, что открывает новые возможности применения УХН.

Особенность нейтроноводов с малыми потерями в стенках состоит в том, что выражения (I3) и (I4) в этом случае предельно упрощаются:

$$K = \frac{1}{1 + eV/4D + R + R_H} ; \quad K_H = \frac{1 + R_H}{1 + eV/4D + R_H + R}$$

По форме записи соотношения для K и K_H представляют собой различные выражения закона Ома для замкнутой электрической цепи. Действительно, если рассматривать $eV/4D, R, R_H$ как некоторые сопротивления во внешней цепи источника тока, выраженные в единицах его внутреннего сопротивления, то K определяет отношение тока в цепи к току короткого замыкания или коэффициент передачи по току. При этих же условиях K_H определяет отношение падения напряжения на внутреннем сопротивлении и сопротивлении нагрузки к ЭДС или коэффициент передачи по напряжению. В свете этой же аналогии нагрузочная кривая нейтроновода эквивалентна вольт-амперной характеристике, а процесс наполнения сосуда нейтронами из нейтроновода — заряду конденсатора от источника тока. Аналогия ток — нейтронный поток и напряжение — плотность нейтронного потока поясняет смысл введения понятий сопротивления нейтроновода, отражающих элементы, нагрузки и является очень наглядной для качественного понимания динамики газа УХН в нейтроноводах.

6. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ НЕЙТРОНОВОД ДЛЯ ВЫВЕДЕНИЯ УХН НА РЕАКТОРЕ СМ-2

В период 1973–1980 гг. на реакторе СМ-2 было создано пять различных [7, 10] установок для получения УХН методом выведения их из конверторов горизонтальными транспортными нейтроноводами. В последних четырех конструкциях [7] исполь-

зовались конверторы из гидрида циркония и нейтронводы из нержавеющей стали. Достигнутая максимальная плотность потока УХН не превышала 56 нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ при $R_H = \infty$ и 20 нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ при $R_H = 0$, что заметно ниже расчетной плотности потока УХН из конвертора при энергии $0-1,8 \cdot 10^{-7}$ эВ. Теоретически [4] эта величина при плотности потока тепловых нейтронов $(2-4) \cdot 10^{14}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, температуре нейтронного спектра и конвертора 80°C должна составлять 640-1280 нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$.

Низкая эффективность получения УХН могла быть обусловлена двумя причинами. Первая из них - уменьшенный (по сравнению с расчетным) выход УХН из гидрид-циркониевого конвертора. Вторая - плохое пропускание нейтронов транспортными нейтронводами, которые использовались в данных установках. Чтобы установить, какая из них является главной, необходимо было осуществить выведение УХН транспортным нейтронводом с точно известным пропусканием. С другой стороны, чтобы получить максимально возможную плотность выведенного потока, нужно было увеличить пропускание нейтронвода до предельно возможной величины.

Использовавшиеся на СМ-2 нейтронводы УХН имели длину около 7 м, диаметр 90 мм, три-четыре поворота на 45° и одну вакуумную разделительную мембрану. Для изготовления их применялись промышленные электрополированные трубы из нержавеющей стали ($G = (0,1-0,2)$ и $\mu = 2 \cdot 10^{-3}$ при $v = 4,7$ м/с). Увеличение пропускания можно было осуществить повышением пропускания прямых участков, уменьшением угла и количества угловых поворотов, удалением разделительной мембраны. Все эти меры были приняты при изготовлении транспортного нейтронвода последней, шестой установки УХН на реакторе СМ-2 (рис. 10).

Как уже упоминалось (разд. 5), зеркальность промышленных электрополированных труб можно заметно увеличить, если поверхность их дополнительно обработать шлифовкой и электрополированием в H_2PQ . Такая обработка труб была проведена при изготовлении прямых участков нейтронвода. Для прямой

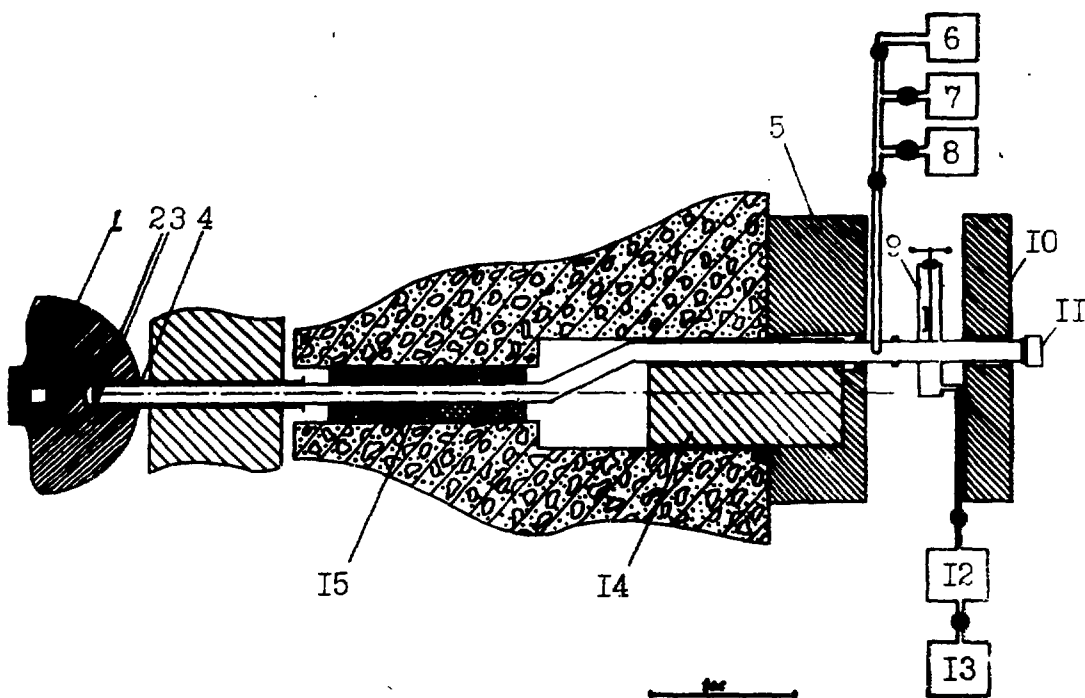


Рис. 10. Схема установки для получения УХН на реакторе СМ-2: I - активная зона; 2 - горизонтальный канал; 3 - конвертор; 4 - нейтроновод; 5 - защита; 6 - форвакуумный, 7 - адсорбционный и 8 - электроразрядный (НЭМ-300) насосы; 9 - вакуумный шибер УХН; 10 - дополнительная защита; II - детектор УХН; I2 - электроразрядный (НОРД-100) и I3 - адсорбционный насосы; I4 - большая пробка защиты и I5 - малая

трубы, длиной 7 м и диаметром 90 мм, полученное значение K_H составило $0,60 \pm 0,02$ при $R_H = \infty$ и $0,36 \pm 0,02$ при $R_H = 0$, что соответствует параметру $G = 0,04$ при $\bar{\mu} = 2 \cdot 10^{-3}$ (при средней скорости нейтронов 4,7 м/с, см. рис. 9).

Обработанная таким образом прямая труба была разрезана на три прямых участка, из которых сваркой изготовлялся нейтроновод. При сварке весь нейтроновод наполнялся аргоном, чтобы сохранить качество поверхности около швов. Нейтроновод имел лишь два поворота на $22,5^\circ$, создававших до-

полнительное сопротивление ($R = 0,4$). Больше "выпрямление" нейтронновода было уже опасно с точки зрения дозиметрической обстановки в экспериментальном зале. Разделительной вакуумной мембраны в нейтронноводе не ставили. Перед постановкой в реактор нейтронновод был испытан на пропускание. Для УХН со скоростью $4,7$ м/с значение K_H составило $0,58 \pm 0,03$ при $R_H = \infty$ и $0,32 \pm 0,02$ при $R_H = 0$.

Как и в предыдущих конструкциях, конвертор был изготовлен из гидрида циркония в виде диска (диаметр 90 мм и толщина $1,5$ мм), охлаждавшегося дистиллированной водой. В связи с удалением вакуумной мембраны дополнительно подключали насос (НОРД-100). Для обеспечения в зале нормальных радиационных условий после вакуумного шибера нейтронновода устанавливалась еще одна дополнительная защита, через которую проходил выходной патрубок нейтронновода.

Измерения плотности выводимого потока УХН начались сразу же после выхода реактора на мощность. Как известно, традиционный метод измерения этой величины — метод шторочной разницы [1]. К выходному патрубку нейтронновода через переходный сосуд с тонкой поворотной шторкой подключался детектор УХН (рис. II, а). Разница в скорости счета детектора при открытом и закрытом положении шторки, отнесенная к площади сечения нейтронновода, определялась как плотность потока нейтронов, у которых осевая V_z и радиальная V_r компоненты скорости удовлетворяют условиям:

$$V_{гр.г} < V_z < V_{гр.шт}; \\ 0 < V_r < V_{гр.н},$$

где $V_{гр.г}$, $V_{гр.шт}$, $V_{гр.н}$ — граничные скорости материалов входного окна детектора, шторки и нейтронновода соответственно.

Оценка плотности потока методом шторочной разницы имеет несколько недостатков. Во-первых, при $V_{гр.шт} = V_{гр.н}$ шторочная разница соответствует нейтронам, занимающим в пространстве скоростей объем цилиндра, равный $\pi V_{гр.н}^2 (V_{гр.н} - V_{гр.г})$ (см. рис. II, а, справа), а при очень высокой зеркальности нейтронновода даже объем параллелепипеда — $4V_{гр.н}^2 (V_{гр.н} - V_{гр.шт})$. В то же время искомая плотность потока УХН с $V < V_{гр.н}$ соот-

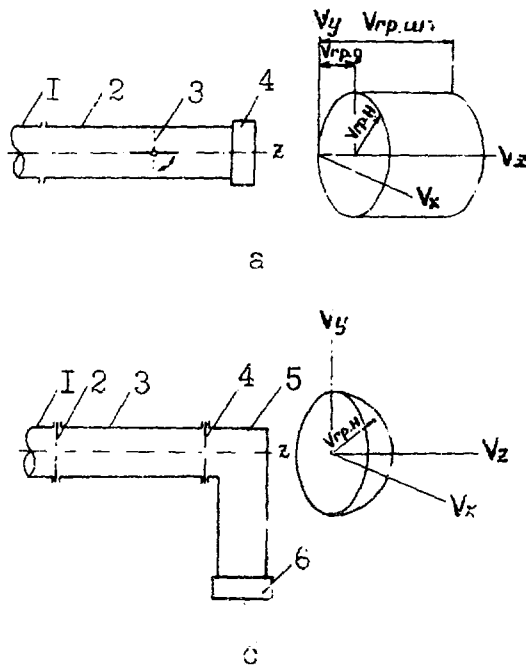


Рис. II. Схема измерения плотности потока УХН: а - метод шторочной разности: 1 - выходной патрубок; 2 - промежуточный сосуд; 3 - шторка; 4 - детектор; б - камерный метод: 1 - выходной патрубок; 2 - передняя стенка камеры; 3 - камера; 4 - задняя стенка камеры; 5 - ускорительный канал; 6 - детектор УХН (справа - объем пространства скоростей, занимаемых нейтронами)

ветствует нейтронам со скоростями, лежащими в объеме полу-сферы величиной $\frac{2}{3}\pi V_{гр.н}^3$ (см. рис. II, б, справа). Во-вторых, из-за неопределенности сопротивления детектора неясно, какому режиму соответствует измеренная таким образом плотность. В третьих, не регистрируются УХН с $V_z < V_{гр.д}$ и фактически не известна эффективность детектора для УХН с

$V_z > V_{гр.д}$. В связи с этим для определения плотности потока был использован камерный метод измерений (см. рис. II, б).

К выходному патрубку подключалась цилиндрическая камера для хранения УХН, изготовленная из нержавеющей стали. Нейтроны входили в камеру через небольшое отверстие в её передней стенке. В другой стенке камеры имелось такое же отверстие, и вышедшие через него нейтроны по вертикальному ускорительному каналу попадали на газовый пропорциональный детектор с алюминиевым входным окном. Эффективность регистрации детектора была близка к 100% для УХН с энергией от 0 до $1,8 \cdot 10^{-7}$ эВ.

Нейтроны с $V > V_{гр.н}$, попав в камеру, после нескольких ударов поглощались в стенках и практически не проходили

к детектору. Нейтроны с $v < v_{\text{гран}}$ длительное время хранились в ней и покидали ее главным образом через входное и выходное отверстия. Искомая плотность потока определялась из соотношения

$$\Phi_{\text{УХН}} = \frac{1}{S_1} (2J_1 + \frac{4J_1 \Omega_K}{S_1 \bar{v} \tau_K}),$$

где J_1 - скорость счета детектора; Ω_K - объем камеры; \bar{v} - средняя скорость выводимых УХН; τ_K - известное из эксперимента время хранения УХН в камере; S_1 - площадь входного (выходного) отверстия. Режим работы нейтронотода регулировался изменением площади полиэтиленового диска, укреплявшегося на входной стенке камеры.

Испытания установки показали, что при максимальной мощности реактора (110 МВт) плотность выводимого потока УХН при энергии 0 - $1,8 \cdot 10^{-7}$ эВ составила 122 нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ при $R = \infty$ и 67 нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ при $R = 0$. Таким образом, в результате увеличения пропускания транспортного нейтронотода плотность выводимого потока удалось поднять в 2,2 раза (накопительный режим) и в 3,4 раза (точный).

Исходя из известной величины пропускания транспортного нейтронотода можно сделать вывод, что истинная плотность потока УХН, выходящих из конвертора, составляет 210 нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, т.е. в три-шесть раз меньше расчетной величины.

ВЫВОДЫ

1. Проведено систематическое исследование пропускания УХН цилиндрическими нейтронотодами из меди и нержавеющей стали при различном качестве обработки их внутренней поверхности. Установлено, что для прямых нейтронотодов $\ell \geq 150\tau$ при любом качестве обработки поверхности процесс распространения УХН описывается диффузионным приближением.

2. В диффузионном приближении получено соотношение для расчета пропускания сложных нейтронотодов с отра-

жающими элементами. Полученное соотношение имеет общий характер и может быть использовано для проектирования и разработки нейтропроводящих систем.

3. Проведено исследование влияния отражающих элементов в виде угловых поворотов, мембран и диафрагм на процесс распространения УХН по нейтроноводам. Определена зависимость сопротивления элементов от их параметров. Разработан и экспериментально проверен метод учета сопротивления отражающих элементов при расчете пропускания нейтронов.

4. Проанализированы типовые режимы работы транспортных нейтроноводов УХН, а также пути и возможности повышения их пропускания.

5. На основе полученных результатов создан транспортный нейтроновод высокого пропускания, использованный в установке для получения УХН на реакторе СМ-2. Описаны параметры установки, обеспечивающей плотность выводимого потока $122 \text{ нейтр./}(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ при $R = \infty$ и $67 \text{ нейтр./}(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ при $R = 0$ для УХН с энергией $(0-1,8) \cdot 10^{-7} \text{ эВ}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лузиков В.И., Покотиловский Ю.И., Стрелков А.В., Шапиро Ф.Л. Наблюдение ультрахолодных нейтронов: Письма в ЖЭТФ, 1969, т.9, вып.1, с.40.
2. Берчану И., Игнатович В.К. Молекулярное течение по трубам идеального газа ультрахолодных нейтронов: Препринт ОИЯИ. Р4-7331. Дубна, 1973.
3. Игнатович В.К. Отражение УХН от шероховатой поверхности. Влияние шероховатостей на коэффициент поглощения: Сообщение ОИЯИ. Р4-7055. Дубна, 1973.
4. Шапиро Ф.Л. Ультрахолодные нейтроны: Там же. Р3-7135, Дубна, 1973.

5. Грошев Л.В., Дворецкий В.Н., Демидов А.М. и др. Опыты с ультрахолодными нейтронами: Препринт ОЯИ. РЗ-7282, Дубна, 1973.
6. Косвинцев Ю.Ю., Кушнер Ю.А., Морозов В.И., Платонов А.П. Распространение УХН по цилиндрическим нейтронпроводам: Препринт НИИАРа. П-268. Дмитровград, 1976.
7. Kosvintsev Yu.Yu., Kulagin E.M., Kushnir Yu.A. et. al. Extraction of ultracold neutrons from high flux reactor SM-2.- Nuclear Instruments and Methods, 1977, v.143, p.133-137.
8. Косвинцев Ю.Ю., Морозов В.И., Терехов Г.И. О причине аномальной утечки УХН из медных и бериллиевых сосудов.- Атомная энергия, 1983, т.55, вып.5, с.288.
9. Косвинцев Ю.Ю., Морозов В.И., Терехов Г.И. Хранение УХН в замкнутом сосуде до β -распада: Письма в ЖЭТФ, 1982, т.36, № 9, с.346.
10. Морозов В.И. Экспериментальные исследования по получению и хранению УХН.- Атомная энергия, 1978, т.45, вып.6, с.442.

Рукопись поступила в ОПИНТИ
25.04.84, обработана 23.10.84.
Окончательно подготовлена
авторами 24.12.84.

Юрий Юрьевич Косвинцев
Василий Иванович Морозов
Григорий Иванович Терехов

РАСПРОСТРАНЕНИЕ НЕЙТРОННОГО ГАЗА ПО НЕЙТРОНОВОДАМ

Редактор З.В.Бодрова

Корректор Т.В.Левина

Подписано в печать 12.03.85. Т-07553. Формат 60x90 1/16.
Печать офсетная. Печ.л.2,3. Уч.-изд.л. 1,9. Тираж 170 экз.
Зак.тип. № 719. . Цена 29 коп. Индекс 3624.

Отпечатано в Научно-исследовательском институте
атомных реакторов им. В.И.Ленина
433510, Димитровград-10, НИИАР

НАСТОЯЩЕЕ ИЗДАНИЕ НИИАРа

ЯВЛЯЕТСЯ самостоятельной, не всегда дублирующей в последствии в других изданиях ПУБЛИКАЦИЕЙ отдельных оригинальных научных трудов НИИАРа, на которую можно сослаться в других публикациях, указывая при этом авторов, наименование, порядковый номер (НИИАР-...), год и место издания (Дмитровград).

ИЗДАЕТСЯ с целью более быстрой или более полной информации по сериям


1. Ядерные реакторы
2. Методика и техника облучения
3. Радиационное материаловедение
4. Радиохимия
5. Ядерная физика
6. Вычислительная техника и электроника
7. Вычислительная математика и программирование
8. Информатика и управление

ПЕЧАТАЕТСЯ на роталпринте НИИАРа тиражом 150 экз.

РАССЫЛАЕТСЯ в научные организации, научно-технические библиотеки и отдельным лицам в соответствии с установленным порядком.

29 коп.

Индекс 3624



РАСПРОСТРАНЕНИЕ НЕЙТРОННОГО ГАЗА
ПО НЕЙТРОНОВОДАМ

Препринт. НИИАР-14(660), 1985, 1-32

