

106/1-41

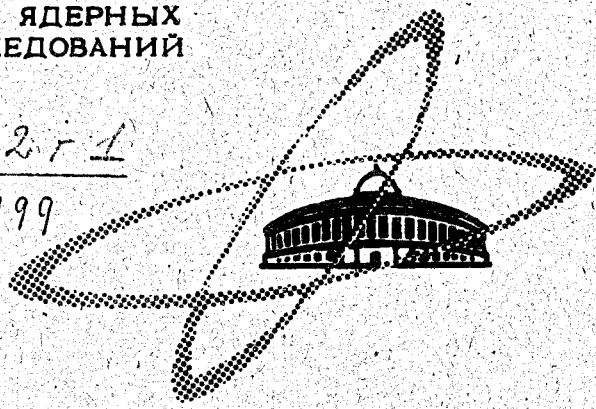
ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

С 342.7.1

Г-899

P3-5392



ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

Л.В. Грошев, В.Н. Дворецкий, А.М. Демидов,
В.И. Лущиков, Ю.Н. Панин, Ю.Н. Покотилловский,
А.В. Стрелков, Ф.Л. Шапиро

ОПЫТЫ
С УЛЬТРАХОЛОДНЫМИ НЕЙТРОНАМИ

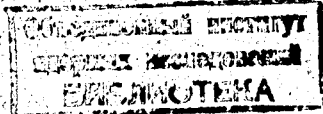
1970

P3-5392

Л.В. Грошев*, В.Н. Дворецкий*, А.М. Демидов*,
В.И. Лушиков, Ю.Н. Панин*, Ю.Н. Покотиловский,
А.В. Стрелков, Ф.Л. Шапиро

**ОПЫТЫ
С УЛЬТРАХОЛОДНЫМИ НЕЙТРОНАМИ**

Направлено в "Phys. Lett."



*Институт атомной энергии им. П.И. Курчатова, Москва.

Ультрахолодными нейтронами (УХН) мы называем нейтроны со скоростью, меньшей $v_0 = (\pi N b)^{1/2} \frac{h}{m}$, где N - число ядер в единице объема, b - когерентная длина рассеяния, m - масса нейтрона. Для меди $v_0 = 5,7$ м/сек, для алюминия - 3,2 м/сек. Как отметил Я.Б. Зельдович^{/1/}, УХН испытывают полное отражение от стенок при любых углах падения и могут ввиду этого храниться в замкнутом сосуде. Авторы^{/2/} извлекли УХН из реактора и подтвердили возможность их хранения. Нейтроны с малыми скоростями, доходящими до области УХН, были получены также в эксперименте^{/3/}, поставленном по предложению проф. Майер-Лейбница^{/4/}; они были использованы для проверки закона $1/v$.

В настоящей работе сообщаются результаты более подробных по сравнению с^{/2/} исследований УХН, выполненных на каналах №3 и №4 реактора ИРТ-М Института атомной энергии им. И.В. Курчатова. Схема установки приведена на рис. 1. Нейтронотвод канала №3 был изготовлен из химически полированных медных труб с внутренним диаметром $2R = 9,4$ см. Поток тепловых нейтронов в месте расположения алюминиевого конвертора составлял $2 \cdot 10^{13}$ н/см² сек. Скорость счета УХН была 1 н/сек при площади детектора 15 см²; через несколько недель она спадала на порядок. Причина этого явления не вполне ясна, однако интенсивность восстанавливалась при промывке канала обезжиривающим составом.

В канале №4 были установлены электрополированные медные трубы, качество которых проверялось измерениями пропускания УХН на канале №3; были также приняты меры к лучшей изоляции канала от контакта с атмосферой и от загрязнения парами масла; был использован детектор с оптимальной толщиной чувствительного слоя. В результате скорость счета УХН возросла до 5 н/сек, хотя по оценкам поток тепловых нейтронов в канале 4 примерно в 3 раза меньше потока в канале 3. Выход УХН из канала 4 за три месяца уменьшился в 3 раза. Фон, вызванный нейтронами со скоростями, большими граничной скорости меди, измерялся, как и в ^{12/}, закрытием детектора медной шторкой толщиной несколько мкм. Он составлял на выходе канала $\approx 50\%$ от счета УХН, но спадал в 10 раз при установке детектора за дополнительным прямоугольным коленом; скорость счета УХН при этом уменьшалась примерно на 30%.

Спектр нейтронов, выходящих из канала 4, измерялся с помощью устройства, изображенного схематически на рис. 2а. Высота h подъема колена, изготовленного из электрополированных медных труб внутренним диаметром 9,4 см, изменялась вращением его вокруг оси пучка. При $h > 0$ до детектора доходят нейтроны с энергией $N \geq h$ (за меру энергии принята максимальная высота подъема в поле тяжести $N = v^2 / 2g$). При $h < 0$ нейтроны с энергией $N > N_{max} - |h|$, где $N_{max} = v_0^2 / 2g$, падая на дно колена, приобретают скорость, большую чем v_0 , и поглощаются в стенках; таким образом, детектора достигают нейтроны с энергией $N \leq N_{max} + h$. Результаты измерений прохождения УХН через колено приведены на рис. 2б. Сплошные кривые на этом рисунке рассчитаны в предположении, что спектр потока УХН соответствует "хвосту" максвелловского распределения, ограниченного сверху и снизу, т.е. $N_{min} \leq N \leq N_{max}$.

$$\Phi(H) dH = \text{Const } H dH . \quad (1)$$

При этом в вакууме минимальная скорость нейтронов, выходящих из алюминиевого конвертора, равна граничной скорости для алюминия, т.е.

$H_{\min} = 0,52$ м; максимальная скорость нейтронов, распространяющихся по медной трубе, равна граничной скорости меди, т.е. $H_{\max} = 1,65$ м (рис. 2в). Как видно, спектр УХН в основных чертах соответствует теоретически ожидаемому.

Спектр УХН оценивался также с помощью измерений по схеме рис. 3а. Можно показать, что скорость счета детектора УХН, приподнятого на высоту h , равна

$$J(h) = \text{const} \int_{H_1}^{H_2} \left(1 - \frac{h}{H}\right) \Phi(H) dH , \quad (2)$$

где

$$H_1 = h, \quad H_2 = H_{\max} \quad \text{при} \quad h > 0;$$

$$H_1 = 0, \quad H_2 = H_{\max} + h \quad \text{при} \quad h < 0.$$

На рис. 3б приведены результаты измерения $J(h)$, а также кривая, вычисленная с помощью (2) для спектра (1). Если для канала 4 имеется примерное согласие с теорией, то для канала 3 при опускании детектора вместо ожидаемого падения наблюдается рост интенсивности. Это означает, что спектр УХН канала 3 обеднен нейтронами со скоростями, близкими к v_0 . Эту особенность можно понять, если допустить, что участок нейтропровода вблизи активной зоны реактора покрылся соединением, обладающим меньшей граничной скоростью, чем чистая медь (например,

для соединения $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, возникающего при радиационной коррозии меди на воздухе, $v_0 = 3,7$ м/сек). Пунктирная кривая на рис. 3б соответствует спектру рис. 3в, 3/4 площади которого заключено между $v = 3,2$ м/сек и $v = 3,7$ м/сек. Эта кривая приведена только для иллюстрации масштаба отклонения спектра канала 3 от (1). Элементарная теория диффузии приводит к следующему выражению для скорости счета УХН /2а/:

$$J = \frac{n_0 v S_d}{4 (\text{ch} \ell / L + \gamma \text{sh} \ell / L)} \frac{n_0 v S_d e^{-\ell / L}}{2(1+\gamma)} \quad \ell / L > 1 \quad (3)$$

Здесь n_0 - плотность УХН у источника; S_d - площадь детектора, ℓ - длина трубы от источника до детектора, L - диффузионная длина, определяемая известным выражением

$$L^2 = D T, \quad (4)$$

где D - коэффициент диффузии, T - среднее время жизни УХН до поглощения (точнее, до поглощения или до выхода из интервала скоростей $v \leq v_0$):

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{\tau} + v \left\langle \frac{\mu}{d} \right\rangle + \lambda P_{\text{He}} \quad (5)$$

В (5) τ - среднее время жизни нейтрона для β_- -распада, μ - вероятность поглощения УХН при одном соударении со стенкой, d - пробег УХН между двумя последовательными столкновениями со стенкой; скобки означают усреднение по направлениям полета нейтрона. P_{He} - давление газообразного гелия, который в некоторых опытах вводился в трубу, $\lambda = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{сек}^{-1} (\text{мм рт.ст.})^{-1}$. Наконец, в (3)

$$y = \frac{Lv}{4D} \frac{S_a + S_d}{S_t}$$

S_a - площадь поглотителя УХН на конце трубы, S_t - площадь сечения трубы, S_d - площадь детектора.

Опыты показали, что выражение (3) неплохо описывает распространение УХН, несмотря на наличие спектра скоростей. На рис. 4 представлены результаты измерений зависимости $J(\ell)$. Экспоненциальная зависимость (3) удовлетворяется, причем для диффузионной длины получается значение $L = 4,7 \pm 0,1$ м. На рис. 5 представлена зависимость $J(S_a)$ при постоянной площади детектора, которая в этом измерении составляла $4,5 \text{ см}^2$. Выражение (3) снова справедливо в пределах точности измерений; используя полученное выше значение L и среднюю скорость нейтрона для спектра (1) $v = 4,8$ м/сек, находим коэффициент диффузии $D = 1,7 \pm 0,2 \text{ м}^2/\text{сек}$. Эта величина в 10 ± 13 раз больше коэффициента диффузии $D = \frac{2Rv}{3}$, соответствующего полностью диффузному отражению нейтронов от стенок трубы. На рис. 6 приведены измерения зависимости скорости счёта УХН от давления гелия в трубе. Сплошные кривые вычислены по формуле (3); при известных L и D единственным свободным параметром этих расчетов является начальный поток УХН $\frac{n_0 v}{4}$. Из нормировки к экспериментальным точкам для него получается значение $\frac{n_0 v}{4} = 0,8 \text{ н/см}^2 \text{ сек}^x$; оно заметно меньше ожидаемой величины

$$\frac{n_0 v}{4} = \frac{1}{8} F_T \left(\frac{v_0}{v_T} \right)^4 \frac{\sigma_{ie}}{\sigma_{ie} + \sigma_a} = 5 \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \text{ сек}}$$

^{x/} Приведено к скорости счёта 5 н/сек на выходе канала №4 при $P_{He} = 0$. Эффективность детектора предполагается равной 1; есть основания думать, что она близка к 1, хотя прямыми опытами это не проверялось.

Значения $\frac{n_0 v}{4}$ для двух кривых рис. 6 отличаются на 20%.

где $F_T \approx 7 \cdot 10^{12}$ н/см² сек - поток тепловых нейтронов на алюминиевом конверторе, v_T - наиболее вероятная скорость теплового спектра (v_T принималось равным 2600 м/сек), σ_{1e} , σ_a - сечения неупругого рассеяния и захвата УХН в конверторе; для алюминия при 400°К

$$\sigma_{1e} / (\sigma_{1e} + \sigma_a) = 0,19 \quad /5/.$$

Среднее время жизни нейтрона в электрополированной медной трубе диаметром 9,4 см, вычисленное из значений L и D , оказывается равным $T = 13 + 1,5$ сек, что соответствует среднему числу ударов о стенку до поглощения $\nu = \frac{1}{\mu} \approx 10^3$. Ожидаемое значение для идеально гладкой поверхности чистой меди для спектра рис. 2в примерно в 5 раз больше (ср. выражение для μ , приведенное в /2а/).

Нами проводились также и прямые измерения времени жизни нейтронов в замкнутом сосуде; схема и некоторые результаты измерений приведены на рис. 7. Для меди наблюдались значения ν в пределах 500-1500; в этих же пределах находились значения ν для бериллия, пиролитического графита и тефлона, хотя для них ожидаемое значение ν в 20-30 раз больше, чем для меди.

Простейшая гипотеза, объясняющая эти наблюдения, состоит в том, что уменьшение времени жизни обусловлено водяной или другой водородосодержащей пленкой, толщина которой должна быть порядка 100 Å. При нагреве сосуда в вакууме такая пленка должна улечиваться. Охлаждение сосуда должно приводить к уменьшению сечения неупругого рассеяния нейтронов на пленке. В обоих случаях время жизни нейтрона должно возрастать. Беглые измерения с медью при температуре 250°С и с графитом при температуре - 190°С не обнаружили большого изменения времени хранения. Таким образом, гипотеза пленки не подтвердилась; однако и опыты не были достаточно подробными, чтобы можно было считать ее опровергнутой. Вопрос о причине расхождения между наблюдаемыми в наших опытах временами хранения и элементарной теорией /2а/, относящейся к поверхности без пор и шероховатостей, оста-

ется открытым для дальнейшего изучения. Отметим только, что с помощью опытов типа показанных на рис. 2 и 3 мы убедились, что при распространении УХН по медным трубам не происходит (в пределах точности измерений) постепенного разогревания УХН, которое могло бы в принципе вызываться вибрациями стенок или флюктуирующими магнитными полями.

Настоящие эксперименты подтверждают основной вывод работы /2/ о возможности извлечения УХН из реактора и их хранения. Количественно результаты /2/ отличаются от данных настоящей работы гораздо более крутой зависимостью скорости счета УХН от давления гелия, согласующейся с диффузным характером рассеяния нейтронов на стенках и временем их жизни, близким к предсказываемому теорией. Расхождение может быть связано с различием в состоянии нейтронпроводов. Не исключено, однако, что в какой-то мере оно обусловлено примесями к гелию в работе /2/, в частности продуктами расщепления полиэтиленового радиатора УХН под действием излучения реактора.

Статья с более подробным описанием и обсуждением экспериментов будет направлена в ЖЭТФ.

Авторы благодарят А.П. Александрова и И.М. Франка за интерес к работе, Я.Б. Зельдовича за полезное обсуждение; В.Н. Чернышевича и персонал реактора ИРТ-М за внимание и помощь.

Л и т е р а т у р а

1. Я.Б. Зельдович. ЖЭТФ, 36, 1952 (1959).
2. В.И. Лушиков, Ю.Н. Покотиловский, А.В. Стрелков, Ф.Л. Шапиро.
 - а) Препринт ОИЯИ, РЗ-4127, Дубна, 1968.
 - б) Письма ЖЭТФ, 9, 40 (1969).

3. A. Steyerl. Phys.Lett., 29B, 1, 33 (1969).

4. Konferenzbericht Diskussionstagung Neutronenphysik an Forschungsreaktoren, April 25-28 (1967), Jülich, p.217.

5. L.S. Kothari, K.S. Singwi. Phil.Mag., 2, 694 (1957).

Рукопись поступила в издательский отдел
5 октября 1970 года.

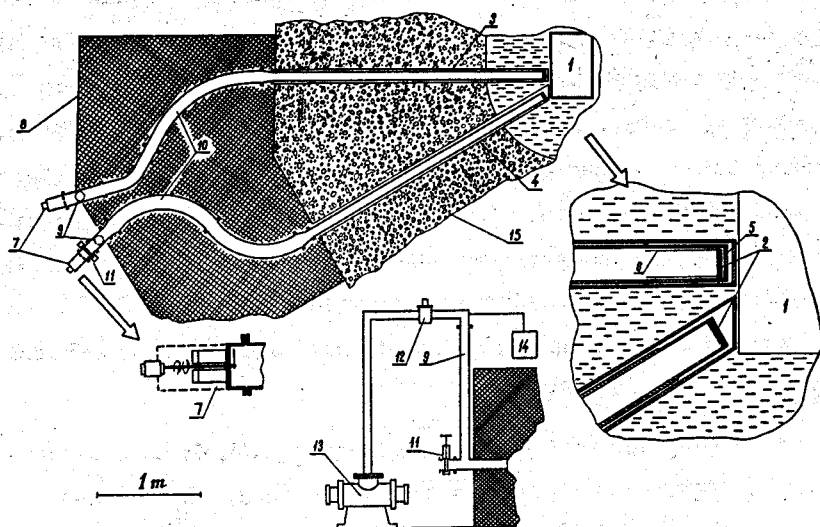


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - активная зона реактора; 2 - конвертор УХН; 3 - 3-й канал реактора; 4 - 4-й канал реактора; 5 - алюминиевый стакан; 6 - медная фольга; 7 - детектор УХН (2 ФЭУ, сцинтиллятор ZnS , покрытый слоем $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ с 80%-ным содержанием ^6Li); 8 - защита прямого пучка; 9 - вертикальный участок нейтроновода для вакуумной откачки; 10 - изогнутые участки нейтроноводов; 11 - щитер; 12 - азотная ловушка; 13 - турбомолекулярный насос; 14 - система наполнения и контроля давления гелия.

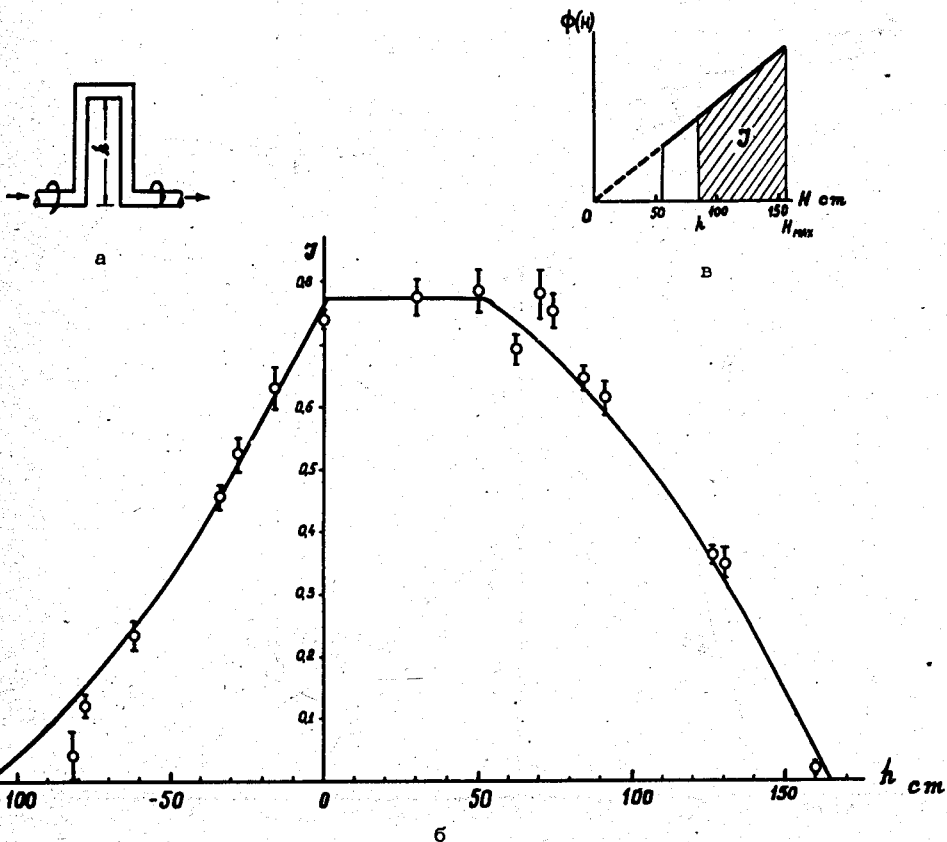


Рис. 2. а) Поворотное колено для измерения спектра УХН,
 б) прохождение УХН через колено на канале 4,
 в) предполагаемый спектр УХН.

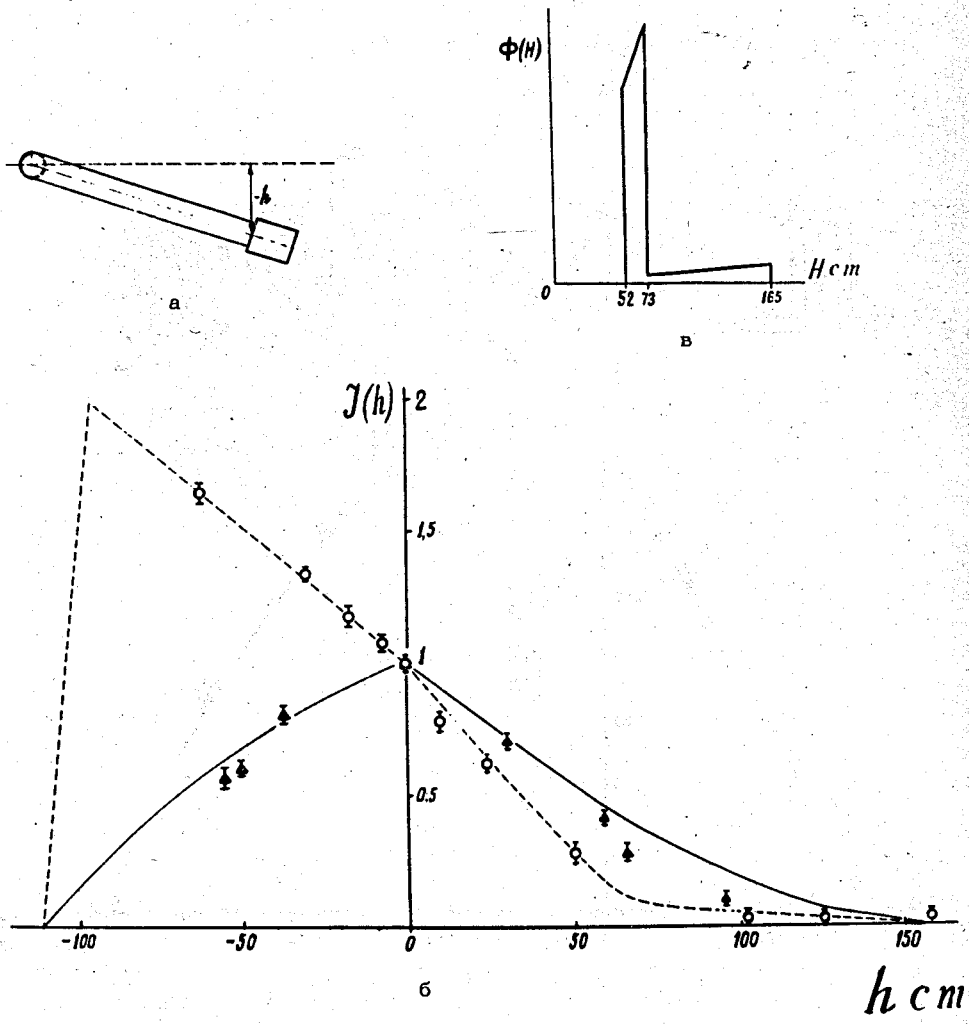


Рис. 3. а) Схема измерений зависимости $J(h)$. б) Результаты измерений $J(h)$ \odot - на канале 3, \blacktriangle - на канале 4. Сплошная и пунктирная кривые вычислены по формуле (2) для спектров рис. 2в и рис. 3в соответственно.

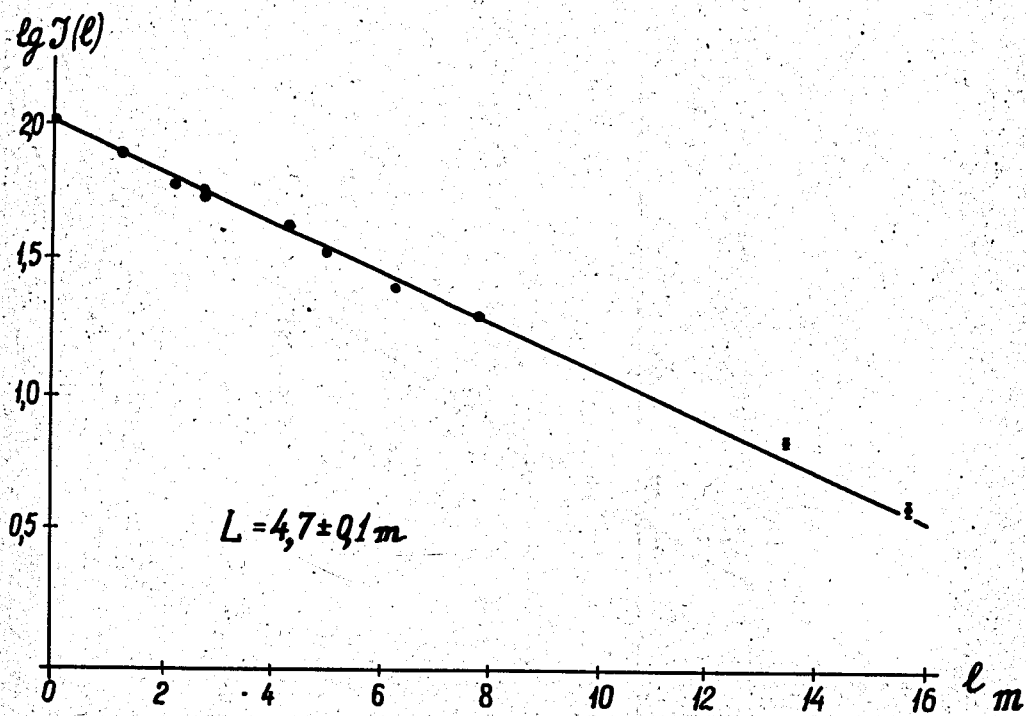


Рис. 4. Зависимость скорости счета УХН от длины нейтронного канала (канал 4).

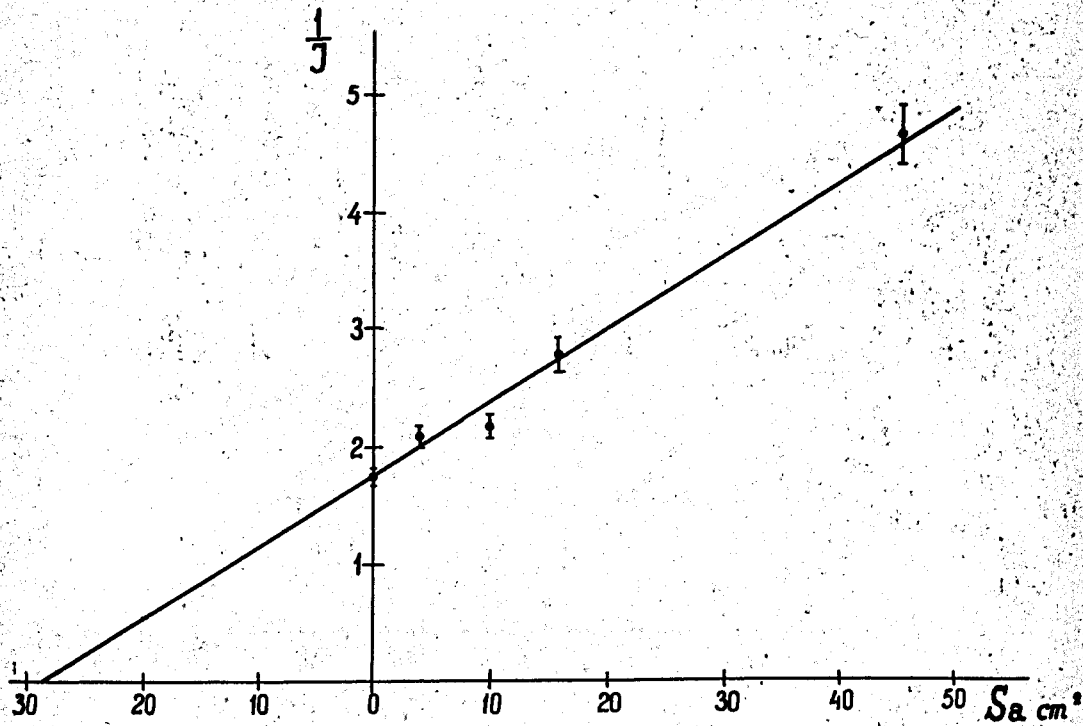


Рис. 5. Зависимость скорости счета УХН от площади поглотителя, установленного на конце нейтроновода (канал 4).

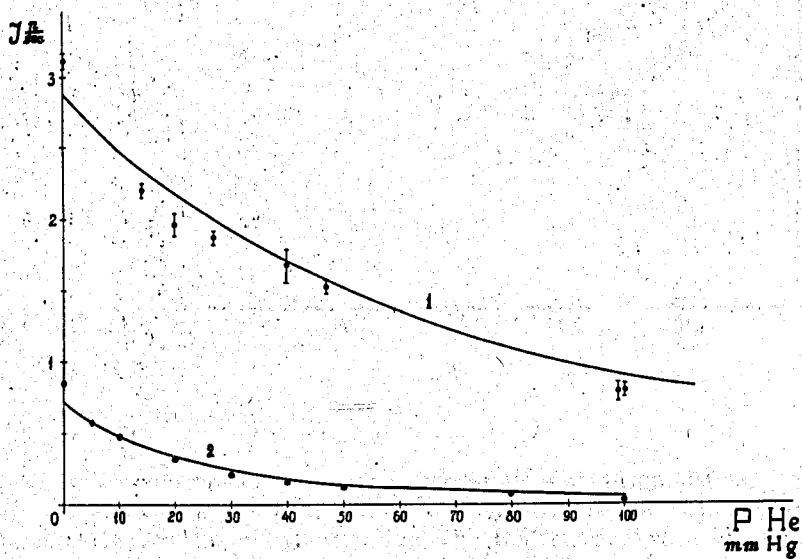


Рис. 6. Зависимость скорости счета УХН от давления гелия в нейтронно-воде (канал 4) для длин нейтронотодов 1) 5,4 м и 2) 11,7 м.

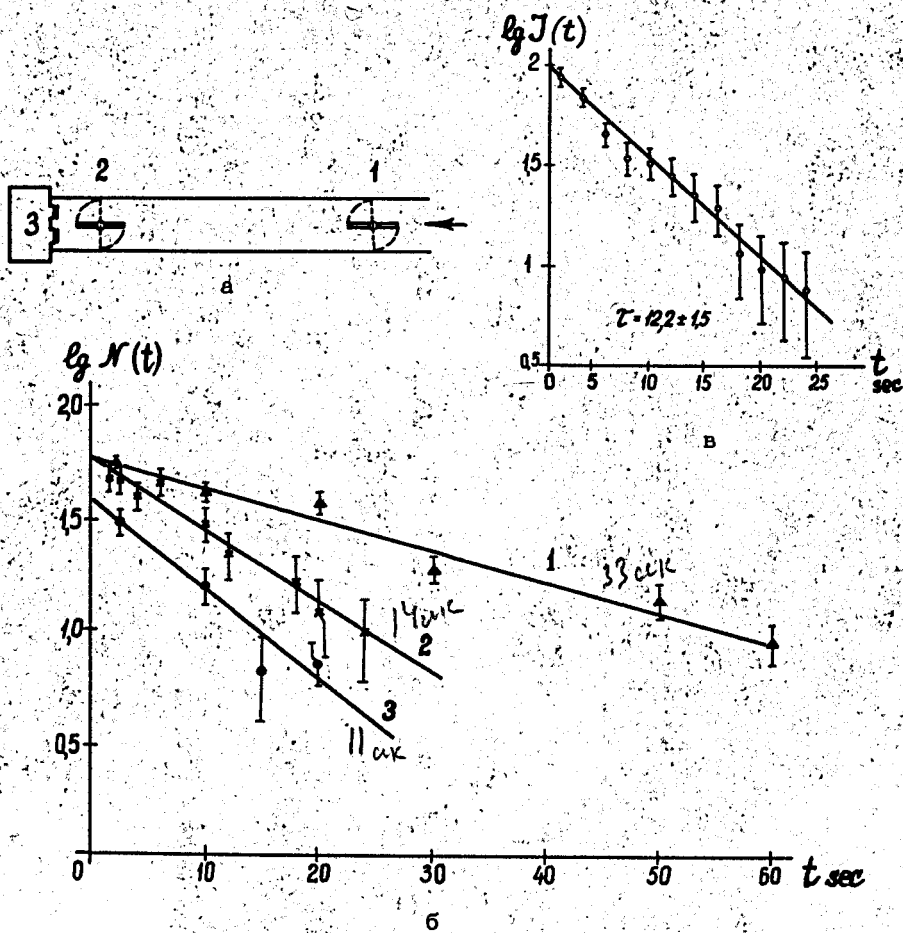


Рис. 7. а) Схема измерения времени жизни нейтронов в замкнутом сосуде (диаметр сосуда 14 см, длина - 174 см). 1,2 - впускная и выпускная заслонки, 3 - детектор УХН. б) Зависимость числа оставшихся нейтронов от времени t хранения нейтронов в сосуде для: 1 - химически полированной медной поверхности, среднее время жизни $T = 33$ сек (канал 3); 2 - необработанной медной фольги, $T = 14$ сек (канал 3); 3 - пирографита, $T = 11$ сек (канал 4). в) Скорость счета УХН в зависимости от времени с момента открытия выпускной заслонки (канал 3).