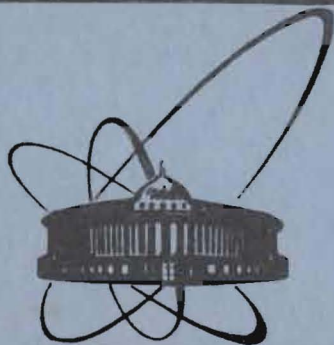


85-195



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P13-85-195

В.Г.Зинов, А.Д.Конин, В.В.Фильченков

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА  
С ЖИДКИМ СЦИНТИЛЛЯТОРОМ NE-213  
ПРОТЯЖЕННЫХ РАЗМЕРОВ

Направлено в "Nucl. Instr. and Meth."

1985

В практике физического эксперимента для регистрации и спектрометрии быстрых нейтронов широко используются детекторы с жидким сцинтиллятором NE-213. К достоинствам этих детекторов относятся высокая эффективность регистрации и возможность осуществления надежного ( $n-\gamma$ )-разделения. Однако, как показывают данные работ /1-3/, в указанных детекторах имеются значительные потери светового излучения при прохождении его через кювету со сцинтиллятором достаточно больших размеров  $\sim 10$  см/. Согласно<sup>1/</sup> для кюветы с размерами  $\phi 10 \times 10$  см коэффициент ослабления света достигает  $K_1 = 1,7$ , а для кюветы с размерами  $2 \times 4 \times 10$  см  $K_2 = 2,5$  \*. Из сравнительного анализа этих данных авторы<sup>1/</sup> получили для длины поглощения света в сцинтилляторе NE-213 значение  $\lambda = 1,5$  м. Значительное поглощение света в нейтронном детекторе приводит к ухудшению энергетического разрешения и вызывает необходимость специального учета этого эффекта при определении эффективности регистрации нейтронов<sup>3/</sup>.

Следует, однако, отметить, что работы<sup>1-3/</sup> были выполнены с обычно используемыми в детекторах указанного типа стеклянными кюветами, покрытыми снаружи диффузным отражателем /MgO или TiO<sub>2</sub>/. Между тем из сравнения данных<sup>1-3/</sup> с данными наших работ /4/ и недавно опубликованной работы<sup>5/</sup> следует, что потери света в стеклянных кюветах в значительной степени обусловлены не поглощением в сцинтилляторе, а дополнительными зеркальными отражениями на наружной поверхности кюветы и поглощением света в стекле и могут быть существенно уменьшены при использовании кювет другого типа. /В /4/ применялись фторопластовые кюветы, а в /5/ - металлические, покрытые изнутри диффузным отражателем/. Это означает, что "эффективный" коэффициент отражения от поверхности стеклянной кюветы в действительности меньше, чем используемое в<sup>1/</sup> значение  $\tau = 0,96$ , и, соответственно, значение длины поглощения света  $\lambda$  должно быть выше найденного в<sup>1/</sup>. Кроме того, используемый в анализе<sup>1/</sup> метод "эффективного числа отражений" представляется слишком грубым для надежного определения величины  $\lambda$ .

\* За величину K здесь принимается отношение амплитуд светового импульса при облучении кюветы вблизи фотокатода ФЭУ и на предельном расстоянии от него.

Целью настоящей работы являлось исследование эффекта потерь светового излучения в детекторе с фторопластовой кюветой, заполняемой сцинтиллятором NE-213. Конструкция детектора описана в /4/. Кювета изготавливалась в виде стакана и стыковалась с ФЭУ таким образом, что сцинтиллятор граничил непосредственно со стеклянной поверхностью фотокатода без промежуточных прозрачных окон. Детектор облучался коллимированным  $\gamma$ -источником <sup>137</sup>Cs на различных расстояниях от фотокатода ФЭУ. Анализировалась зависимость от этого расстояния границы спектра комптоновских электронов. За границу спектра принимался номер канала амплитудного распределения, для которого число отсчетов составляло 0,7 от максимального значения числа отсчетов в канале.

При прохождении через кювету со сцинтиллятором свет испытывает многократные отражения от поверхности кюветы. Потери света обусловлены его поглощением как в самом сцинтилляторе в промежутке между отражениями, так и в веществе кюветы. Поэтому при анализе данных для одного и того же детектора найденные значения  $\tau$  и  $\lambda$  должны сильно коррелировать между собой. С целью устранения этой корреляции нами использовались два детектора, кюветы которых были геометрически подобны и отличались линейными размерами: для "большого" детектора эти размеры составляли  $\phi 90 \times 340$  мм, а для "малого" -  $\phi 27 - 100$  мм. Толщина стенок каждой кюветы равна 5 мм, их наружная поверхность была покрыта алюминизированным майларом. Очевидно, что для одной и той же приведенной длины  $L = H/R$ , где H - расстояние от места облучения до фотокатода, а R - радиус кюветы, эффекты потерь света при отражении должны быть одинаковы, а поглощение света в самом сцинтилляторе различаться.

Процедура измерений была аналогична использованной в<sup>5/</sup>. Положение  $\gamma$ -источника определялось с точностью 1 мм, ширина облучаемой области сцинтиллятора не превышала 4 мм для большого детектора и 3 мм - для малого детектора.

Измерения были проведены с двумя ФЭУ - один из них был типа 58 AVP, а другой - типа XP 2040. Каждый умножитель использовался как с кюветой больших размеров, так и с кюветой малых размеров. Кроме того, для каждого детектора измерения повторялись по несколько раз с заменой сцинтиллятора. Для каждого детектора результаты измерений всех серий хорошо согласуются между собой. Примеры комптоновских распределений от <sup>137</sup>Cs, измеренных с малым детектором при разных значениях L, приведены на рис.1. С учетом повторяемости результатов измерений в различных сериях и интегральной нелинейности аппаратуры, которая проверялась с помощью набора  $\gamma$ -источников в диапазоне энергий 150-1060 кэВ, относительная погрешность в определении границы указанных распределений составляла 0,5-1%.

Результаты измерений амплитуды светового импульса S в зависимости от приведенного расстояния L для двух детекторов показаны на рис.2. Из этого рисунка сразу следуют два заключения.

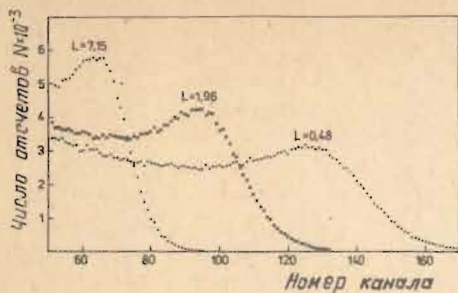
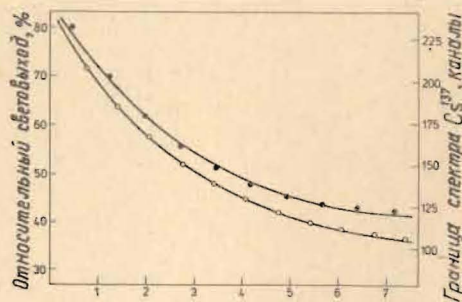


Рис.1. Примеры амплитудных распределений от  $\gamma$ -источника  $^{137}\text{Cs}$ , измеренных с малым детектором  $\phi$  27x102 мм/ при трех различных значениях  $L=N/R$ , где  $N$  - расстояние от места облучения до фотокатода ФЭУ,  $R$  - радиус детектора.

Рис.2. Зависимость положения границы спектра комптоновских электронов  $\gamma$ -источника  $^{137}\text{Cs}$  / относительного световыхода / от расстояния между местом облучения и фотокатодом ФЭУ ( $L$ ). Экспериментальные точки:  $\bullet$  - малый детектор с размерами кюветы  $\phi$  2,7x10,2 см;  $\circ$  - большой детектор с кюветой  $\phi$  9x34 см. Линии соответствуют зависимостям, найденным на ЭВМ для оптимальных значений коэффициента отражения  $\Gamma$  и длины поглощения  $\lambda$ .



Во-первых, имеет место различие в зависимостях  $S(L)$  для малого и большого детекторов, т.е. наблюдается эффект поглощения света непосредственно в сцинтилляторе. Во-вторых, ослабление света с расстоянием заметно меньше, чем в детекторах со стеклянными кюветами. Так, для малого детектора максимальное ослабление составляет  $K=1,8$  по сравнению с величиной  $K=2,5$ , полученной в  $1/\lambda$  для детектора с близкими линейными размерами и геометрией. Что касается самого характера экспериментальных распределений  $S(L)$ , то они качественно согласуются с распределениями, измеренными в  $1/\lambda$  с детектором близкой геометрии  $\phi$  50x150 мм/.

Экспериментальные данные, представленные на рис.2, были проанализированы с целью независимого определения каждой из двух величин, определяющих потери света - коэффициента отражения  $\Gamma$  и длины поглощения  $\lambda$ . Ранее в  $1/\lambda$  для анализа было использовано соотношение

$$K_1 = (\Gamma \cdot e^{-\bar{l}_1/\lambda})^{n_1},$$

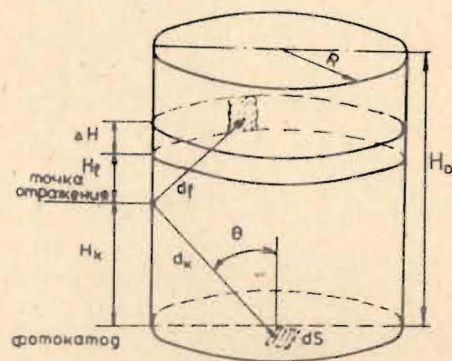
1/1

где  $K$  - коэффициент ослабления света, измеренный для двух детекторов с различными размерами;  $\bar{l} = 4V/\Sigma / V$  - объем детектора,  $\Sigma$  - площадь его поверхности/ - средняя длина пробега фотонов в сцинтилляторе;  $n$  - "эффективное" число отражений. Очевидно, что с помощью  $1/\lambda$  можно получить лишь соотношение между величинами  $\Gamma$  и  $\lambda$ , поэтому для определения  $\lambda$  авторы зафиксировали значение  $\Gamma = 0,96$ . Что касается работы  $1/\lambda$ , где были измерены распределения  $S(L)$ , то авторов скорее интересовало получение аппроксимирующего выражения для  $S(L)$ , чем физический смысл параметров, определяющих это выражение.

В настоящей работе для обработки экспериментальных данных был разработан и использован более детальный метод, позволяющий находить распределение интенсивности света по длине детектора и вычислять количество света, попадающее на ФЭУ, последовательно после каждого цикла отражений. Вся длина детектора была разбита на 12 равных интервалов с длиной  $\Delta L = \Delta N/R = 0,63$ . После каждого цикла отражений находилось количество света  $A_1/I = 1-12/\lambda$  для 12 элементов боковой поверхности кюветы и его задней отражающей поверхности ( $A_{13}$ ). В расчетах были использованы функция  $E(L)$  телесного угла диска по отношению к находящемуся от него на некотором расстоянии  $L$  другому диску и функция  $F(L)$  для диска по отношению к некоторой точке боковой поверхности цилиндра. Эти функции определялись путем численного интегрирования выражения для элемента телесного угла

$$d\Omega = dS \cos \theta / d^2$$

/см. рис.3/; результаты вычислений  $E(L)$  и  $F(L)$  находятся в согласии с расчетами  $1/\lambda$ . Функции  $E(L)$  и  $F(L)$  нормировались так, чтобы  $E(0) = F(0) = 0,5$ , и использовались в виде таблиц по 12 значений в каждой, причем  $E_1 = E(\Delta L)$ ,  $E_2 = E(2\Delta L)$  и т.д., а  $F_1(L) = F(\Delta L/2)$ ,  $F_2 = F(3\Delta L/2)$  и т.д.



Геометрия детектора показана на рис.3. После каждого отражения фотон может попасть: 1/ на ФЭУ с вероятностью  $W_\phi = E(H_k/R)$ ; 2/ на заднюю отражающую поверхность с вероятностью  $W_\Sigma = E[(H_0 - H_k)/R]$ ; 3/ в один из элементов боковой поверхности с вероятностью  $W_\theta = F[(H_\ell + \Delta H)/R] - F(H_\ell/R)$ .

Рис.3. Геометрия цилиндрического сцинтиллятора.

Алгоритм построения суммарного /для всех циклов отражений/ количества света  $S=N/N_0$ , где  $N_0$  - начальное число фотонов, выделившееся в сцинтиллаторе,  $N$  - число фотонов, достигшее ФЭУ, сводился, в основном, к следующему.

1. Задавалось положение места облучения ( $L$ ) детектора у-источником и определялось "прямое" количество света на ФЭУ

$$S_0 = E(L) e^{-t_L/\lambda}$$

2. Вычислялось распределение света после первого отражения

$$A_I^{(1)} = G_J \cdot r \cdot e^{-l_J/\lambda} \quad (I=1-12), \quad A_{13}^{(1)} = E_{J-1} \cdot r \cdot e^{-t_{J-1}/\lambda}$$

Здесь

$$G_1 = 0,5 - E_1; \quad G_I = E_{I-1} - E_I, \quad I \neq 1;$$

$J = J' = L - I + 1$  для  $L \geq I$  и  $J = |J'| + 1$  для  $L < I$ ;  $l_J$  и  $t_{J-1}$  - средние расстояния от места излучения до соответствующего элемента боковой поверхности ( $l$ ) или до плоскости поперечного сечения детектора ( $t$ ) /фотокатод или задняя отражающая поверхность/.

3. Вычислялось количество света, попадающего на ФЭУ, после первого цикла отражений:

$$S_1 = \sum_{I=1}^{12} A_I^{(1)} \cdot F_I \cdot e^{-t_I/\lambda} + 2A_{13}^{(1)} E_{12} e^{-t_{12}/\lambda}$$

4. Находилась распределение света после второго цикла отражений

$$A_I^{(2)} = \sum_{N=1}^{12} A_N^{(1)} \cdot \Phi_J \cdot r \cdot e^{-l_J/\lambda} + 2A_{13}^{(1)} \cdot G_{J-1} \cdot r \cdot e^{-t_{J-1}/\lambda}, \quad I=1-12,$$

$$A_{13}^{(2)} = \sum_{N=1}^{12} A_N^{(1)} E_{J-1} \cdot r \cdot e^{-t_{J-1}/\lambda}$$

где

$$J = |N - I| + 1, \quad \Phi_1 = 1 - 2F_1, \quad \Phi_I = F_{I-1} - F_I$$

5. Определялось количество света на ФЭУ после второго цикла отражений

$$S_2 = \sum_{I=1}^{12} A_I^{(2)} \cdot F_I \cdot e^{-t_I/\lambda} + 2A_{13}^{(2)} \cdot E_{12} e^{-t_{12}/\lambda}$$

6. Определялись распределение света и количество его на ФЭУ после третьего, четвертого и т.д. циклов отражений. Всего рассчитывалось такое количество циклов  $k$ , чтобы обеспечить точность в суммарном количестве света  $S = S_0 + \sum_{m=1}^k S_m$  не хуже 0,1%. Реально приходилось учитывать 50 и более циклов отражений.

Некоторые результаты расчетов приведены на рис.4.

Рис.4а иллюстрирует, как меняется функция  $S(L)$  при изменении параметра  $r$  от 0,85 до 0,97, а рис.4б - при изменении параметра  $\lambda$  от 1 до 10 м.

Определение искомым значений  $r$  и  $\lambda$  происходило путем сравнения по методу наименьших квадратов /МНК/ расчетных функций  $S(L)$  с экспериментальными распределениями для большого и малого детекторов. Указанный анализ проводился как отдельно для каждого детектора, так и совместно для двух детекторов. В ходе раздельного анализа находились оптимальные значения  $r_{\text{опт}}$ .

параметра  $r$  для ряда последовательных значений  $\lambda$  от 3 до 30 м. При этом было установлено, что для большого детектора имеет место хорошее согласие /  $\chi^2_{\text{мин}} = 6-8$  / расчетов и эксперимента при использовании в качестве суммарной погрешности измерений и вычислений  $S(L)$  величины, определяемой только ошибкой измерений границы спектра  $^{137}\text{Cs}$  /  $\Delta = 1$  канал/. Что касается малого детектора, то для него при использовании той же погрешности в 1 канал получают значения  $\chi^2_{\text{мин}} = 30$ , при-

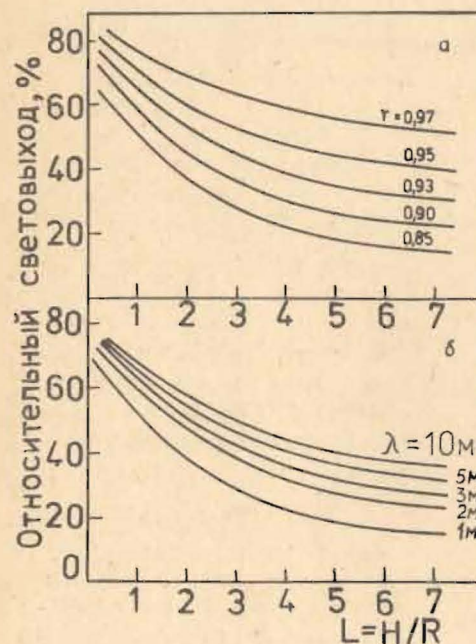


Рис.4. Зависимости количества света, достигшего ФЭУ от расстояния между местом облучения и фотокатодом. Вычислены на ЭВМ для детектора  $\phi 9 \times 34$  см при значениях параметров  $r$  и  $\lambda$ : а/  $\lambda = \infty$ ,  $r = 0,85-0,97$ ; б/  $r = 0,955$ ,  $\lambda = 1-10$  м.

чем согласие расчетов и эксперимента не удается существенно улучшить при вариации величины  $S(L)$  в пределах возможных погрешностей определения  $L$ . По-видимому, это связано с тем обстоятельством, что в расчетах не были учтены возможные отклонения от диффузного характера отражения света на тефлоне или

некоторое изменение его отражательной способности с длиной кюветы. Однако, как можно видеть из рис.2, где приведены расчетные распределения  $S(L)$  с оптимальными значениями параметров  $\Gamma$  и  $\lambda$ , различие в характере экспериментального и расчетного распределений невелико. В связи с этим для малого детектора мы использовали в качестве суммарной ошибки вычислений и измерений  $S(L)$  величину  $\Delta' = 2$  канала, что соответствует относительной погрешности значений  $S$  в пределах 1-2%. При этом значения  $\chi_{\min}^2$  становятся близкими к ожидаемому /  $\chi_{\min}^2 = 7-10$  / , а функции  $\chi^2(\Gamma)$  хорошо аппроксимируются квадратичной параболой.

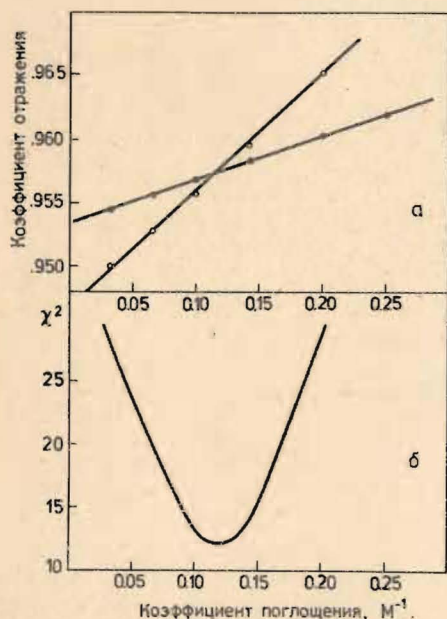


Рис.5. Результаты анализа на ЭВМ экспериментальных распределений  $S(L)$ : а - оптимальные значения /  $\Gamma_{\text{опт.}}$  / коэффициента отражения для большого (○) и малого (●) детекторов в зависимости от коэффициента поглощения  $\beta = 1/\lambda$ ; б - зависимость  $\chi_{\min}^2(\beta)$ , полученная в ходе совместной обработки распределений для двух детекторов.

Результаты раздельного анализа для каждого детектора можно видеть на рис.5а, где представлены оптимальные значения  $\Gamma_{\text{опт.}}$  для ряда значений коэффициента поглощения  $\beta = 1/\lambda$ . Пересечение линий, соответствующих функциям  $\Gamma_{\text{опт.}}(\beta)$  для двух детек-

торов, определяет, очевидно, искомые значения  $\Gamma$  и  $\lambda$ . Эти же самые значения  $\Gamma$  и  $\lambda$  получаются и при совместном анализе распределений двух детекторов. На рис.5б приведены минимальные значения  $\chi_{\min}^2(\beta)$ , полученные в ходе совместного анализа. Можно видеть, что положение экстремума совпадает с местом пересечения линий  $\Gamma_{\text{опт.}}(\beta)$ .

Найденное нами значение  $\beta$  составляет

$$\beta = 0,118 \pm 0,022 \text{ м}^{-1}. \quad /2/$$

Оно соответствует длине поглощения  $\lambda = 7-10$  м, что значительно превосходит измеренное ранее /1/ значение  $\lambda \approx 1,5$  м. Для коэффициента отражения тефлона получено значение

$$\Gamma = 0,957 \pm 0,002, \quad /3/$$

что близко к параметрам лучших диффузных отражателей /  $\text{MgO}$  и  $\text{TiO}_2$  /. В значении  $\Gamma$  может присутствовать некоторое систематическое смещение /на наш взгляд, не более 0,005/, связанное с возможным несовершенством метода расчетов, однако оно не должно сказаться на величине  $\lambda$ , т.к. этот метод был одинаков для обоих детекторов.

Расчетные функции  $S(L)$  с оптимальными значениями /2/-/3/  $\beta$  и  $\Gamma$  приведены на рис.2. Как можно видеть, имеет место хорошее согласие между экспериментом и вычислениями. В связи с этим отметим следующее обстоятельство. Поскольку в измерениях с кюветами больших и малых размеров мы использовали одни и те же ФЭУ, мы имели возможность /что и сделано на рис.2/ привести экспериментальные распределения к одному и тому же коэффициенту усиления детектора. При этом оказалось, что отношение сумм всех измеренных значений  $S(L)$  для малого и большого детекторов, т.е. относительная высота этих распределений, с хорошей точностью /  $\leq 0,5\%$  / совпадает с соответствующей величиной, полученной для расчетных функций  $S(L)$  с оптимальными параметрами  $\Gamma$  и  $\beta$ .

Как можно видеть из рис.5а, функции  $\Gamma_{\text{опт.}}(\beta)$  аппроксимируются прямыми линиями с коэффициентами наклона, отличающимися примерно в три раза. Очевидно, это связано с тем обстоятельством, что при  $\Gamma \approx 1$  и  $\beta \bar{l} \ll 1$  /где  $\bar{l} = 4V/\Sigma = 2R/(1+R/H)$  - средняя длина пробега фотонов в сцинтилляторе/ потеря света в каждом цикле  $q =$

$= \Gamma \cdot e^{-\beta \bar{l}}$  может быть представлена как  $q \approx \Gamma(1 - \beta \bar{l})$ , откуда

$$\Gamma_i \approx q_i (1 + \beta \bar{l}_i). \quad /4/$$

Таким образом, в условиях наших измерений выполняется одно из приближений для формулы /1/, а именно - возможность усреднения по длинам пробегов. В связи с этим интересно попытаться воспользоваться этой формулой для анализа полученных нами данных /2/, /3/. Поскольку в нашем случае геометрия двух детекторов была одинаковой, можно с большим основанием положить  $n_1 = n_2$  /вне зависимости от того, какой физический смысл придавать величине  $n$ /. Тогда, используя экспериментальные значения коэффициента ослабления света для каждого детектора, получим соотношение между величинами  $\Gamma$  и  $\beta$ , которое, как оказывается, удовлетворяется при найденных нами значениях /2/, /3/.

Полученные нами данные свидетельствуют о высокой прозрачности сцинтиллятора NE-213. Как можно видеть из /2/ и рис.5, значения  $\lambda < 5$  м исключаются с большой достоверностью. Что касается возможных систематических погрешностей, то наиболее серьезным их источником являлось бы, по нашему мнению, некоторое различие в значениях коэффициента отражения для малого и большого детекторов из-за возможного различия в свойствах использованного в них тефлона. Для того чтобы оценить обусловленное этой причиной возможное систематическое смещение в значении  $\lambda$ ,

воспользуемся соотношением /4/. Из полученных в ходе отдельного анализа данных следует, что для большого детектора  $q = 0,948$ . Подставив это значение в формулу /4/ и варьируя  $\gamma$ , можно видеть, что даже при  $\gamma = 0,967$ , что на 0,010 больше найденного нами значения /3/, величина  $\lambda$  не превышает 4 м.

В заключение отметим, что согласно нашим измерениям основные свойства сцинтиллятора NE-213 - световыход и прозрачность - сохраняются при его длительном /несколько лет/ хранении. Однако для сохранения этих параметров при работе с указанным сцинтиллятором необходимо соблюдать особую аккуратность во избежание его возможных загрязнений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kuijper P., Tiesinga C.J., Jonker C.C. Nucl. Instr. and Meth., 1966, 42, p.56.
2. Bertin A., Vitale A., Placci A. Nucl. Instr. and Meth., 1969, 68, p.24.
3. De Leo R., et al. Nucl. Instr. and Meth., 1974, 119, p.559.
4. Зинов В.Г. и др. ПТЭ, 1982, 2, с.26;  
Быстрицкий В.М. и др. ЖЭТФ, 1981, 80, с.1700.
5. Annand J.R.M., Galloway R.B. Nucl. Instr. and Meth., 1983, 211, p.421.
6. Gardner R.P., Carnesale A. Nucl. Instr. and Meth., 1969, 73, p.228.
7. Gardner R.P., Verghese K. Nucl. Instr. and Meth., 1971, 93, p.163.

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 марта 1985 года.

Зинов В.Г., Конин А.Д., Фильченков В.В. P13-85-195  
Исследование параметров нейтронного детектора  
с жидким сцинтиллятором NE-213 протяженных размеров

Исследовались параметры нейтронного детектора с жидким сцинтиллятором NE-213, заполнявшим фторопластовую кювету протяженных размеров. Показано, что эффект ослабления сцинтилляционного излучения для фторопластовой кюветы значительно меньше, чем для стеклянной кюветы с внешним отражателем. На основании проведенных измерений получено значение длины поглощения света в сцинтилляторе NE-213  $\lambda = 7-10$  м, что существенно отличается от значения  $\lambda \approx 1,5$  м, найденного ранее другими авторами. Полученные данные о прозрачности сцинтиллятора NE-213 свидетельствуют о том, что он с успехом может быть использован в детекторах больших размеров /~ 1 м/.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985