



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

---

Л.С. Золин, В.Н. Лебедев, М.И. Салацкая

894

ИНДИВИДУАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ДОЗЫ  
ОТ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

Дубна. 1962 год

Л.С. Золин, В.Н. Лебедев, М.И. Салацкая

894

ИНДИВИДУАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ДОЗЫ  
ОТ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

13621, 48

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

## В в е д е н и е

Наиболее часто в практике нейтронной дозиметрии приходится иметь дело с измерением тканевой дозы нейтронов в поле смешанного гамма-нейтронного излучения неизвестного спектра. В этом случае для точного измерения поглощенной дозы необходимо, чтобы энергетическая зависимость реакции детектора на облучение имела такой же характер, как зависимость тканевой дозы от энергии нейтронов во всем нужном диапазоне энергий. Эффективность регистрации сопутствующего гамма-фона для обеспечения однозначности результатов должна быть минимальной.

В случае применения детектора в качестве индивидуального дозиметра более жесткие требования предъявляются к стабильности его показаний. Показания детектора не должны после облучения самопроизвольно уменьшаться с течением времени, их зависимость от изменений внешних условий (температуры, влажности) должна быть минимальной.

Большинство существующих методов индивидуальной нейтронной дозиметрии (толстослойные фотоэмульсии <sup>1/</sup>, таблетки  $\text{Ca So}_4$  <sup>2/</sup>, конденсаторные дозиметры, электретные детекторы нейтронов и т.д.) не удовлетворяют всем этим требованиям. Наиболее полно им отвечает фотоэмульсионный метод, описанный *J. Cheka* <sup>3/</sup>, в котором в качестве детектора используется эмульсия, окруженная чередующимися слоями радиатора и поглотителя.

В настоящей работе исследовалась возможность применения подобной квазитканезквивалентной системы с отечественной эмульсией типа К для индивидуального контроля дозы от быстрых нейтронов.

### 1. Постановка задачи

Число треков в тонком слое эмульсии, окруженной толстым водородосодержащим радиатором, определяется числом упругих соударений в единице объема радиатора и длиной пробега протонов отдачи (поскольку длина пробега определяет эффективно работающий объем радиатора). С увеличением энергии нейтронов число треков в такой эмульсии будет расти более быстро, чем величина поглощенной дозы, так как пробег протона отдачи растет быстрее, чем его энергия.

Для получения желаемого соответствия между числом треков и дозой необходимо каким-то образом предотвратить попадание в эмульсию "лишних" длинно-пробежных протонов отдачи. Это достигается путем чередования водородосодержащих радиаторов и алюминиевых поглотителей соответствующей толщины.

В настоящей работе использовалась система радиаторов и поглотителей, состоящая из 13 слоев. В таблице 1 приведены толщины всех слоев в порядке следования их друг за другом. Большая часть экспериментов, описываемых ниже, производилась с такой системой. В качестве детектора использовалась ядерная фотоэмульсия типа К толщиной 20 микрон, нанесенная на триацетатную подложку. Эта эмульсия пригодна для регистрации протонов с энергией от 0,3 до 150 Мэв<sup>14</sup>. Химический состав эмульсии приведен в таблице 2.

Т а б л и ц а 1

| № слоя | М а т е р и а л           | Толщина в мг/см <sup>2</sup> |
|--------|---------------------------|------------------------------|
| 1      | Целлюлоза (картон)        | 58                           |
| 2      | Алюминий                  | 83                           |
| 3      | Триацетатная пленка       | 34,4                         |
| 4      | Алюминий                  | 27,7                         |
| 5      | Целлюлоза (черная бумага) | 13,3                         |
| 6      | Подложка эмульсии         | 17,2                         |
| 7      | Эмульсия                  | 6,9                          |
| 8      | Триацетатная пленка       | 17,2                         |
| 9      | Целлюлоза (черная бумага) | 13,3                         |
| 10     | Алюминий                  | 27,7                         |
| 11     | Триацетатная пленка       | 34,4                         |
| 12     | Алюминий                  | 83                           |
| 13     | Целлюлоза (картон)        | 58                           |

Т а б л и ц а 2

| Элементы                            | Ag     | Br     | I      | C      | H       | N      | O      | S      |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| Содержание элементов в г/г эмульсии | 0,4512 | 0,3348 | 0,0008 | 0,0801 | 0,01358 | 0,0237 | 0,0985 | 0,0007 |

Для определения энергетической зависимости реакции эмульсии, заключенной в корректирующий пакет, был рассчитан вклад каждого слоя в общее число треков, зарегистрированных эмульсией при облучении нейтронами, падающими нормально к поверхности. При вычислениях учитывалось, что протоны отдачи с энергией меньшей 0,3 Мэв (что соответствует длине трека ~ 3 микрона) не могут быть зарегистрированы. Расчет велся по методу, предложенному Херстом для определения эффективности нейтронного дозиметра<sup>/5/</sup>. Полученные таким образом кривые зависимости вклада в общее число треков от каждого слоя в отдельности и реакция всего пакета в целом при облучении единичным потоком нейтронов приведены на рис. 1. Конструкция пакета должна быть подобрана таким образом, чтобы энергетическая зависимость числа треков в эмульсии от энергии нейтронов была подобна аналогичной зависимости для поглощенной дозы в биоткани (или так называемой дозовой кривой), рассчитанной по первому столкновению<sup>/8/</sup>. В этом случае дополнительный вклад в число треков в эмульсии, обусловленный нейтронами, претерпевшими многократное рассеяние в теле человека, будет обеспечивать согласие с дозовой кривой, рассчитанной по многократным соударениям.

Из сопоставления указанных зависимостей (рис. 2), совмещенных при энергии 1 Мэв, видно, что реакция пакета при облучении его нейтронами с энергией большей 3 Мэв, превышает поглощенную дозу для биоткани, рассчитанную по первому столкновению.

Однако, в наиболее вероятном в реальных условиях случае изотропного облучения число треков в эмульсии на один падающий нейтрон будет меньше рассчитанного выше из-за наличия эффекта углового падения нейтронов на пленку. Величина этого эффекта легко определяется экспериментально.

## II. Эксперимент

Экспериментальная проверка проведенных выше расчетов производилась на пучках моноэнергетических нейтронов с энергией 2,5 Мэв и 14 Мэв, получаемых из реакций  $D(d,n)He^3$  и  $T(d,n)He^4$ , соответственно, и на нейтронах Po-Be источника с эффективной (по дозовому действию) энергией 3,6 Мэв.

Для проверки величины эффекта углового падения нейтронов часть пакетов с фотоэмульсией располагалась перпендикулярно к направлению пучка, другие -

параллельно, третьи вращались с постоянной угловой скоростью в течение всего времени экспозиции. Результаты эксперимента позволяют установить следующее.

1. При перпендикулярном облучении единичным потоком нейтронов число треков на единицу площади эмульсии в пределах ошибок опыта совпадает с расчетным.

2. При параллельном облучении число треков на единицу площади эмульсии уменьшается почти вдвое.

3. При изотропном облучении (во вращающихся пакетах) число треков на единицу площади эмульсии в среднем на 25% меньше, чем при перпендикулярном облучении.

Экспериментальные точки с указанием ошибок для перечисленных способов облучения приведены на рис. 2. Как можно видеть, точки, полученные при изотропном облучении, в пределах  $\pm 15\%$  совпадают с дозовой кривой для биоткани. Поскольку этот случай наиболее близок к реальным условиям ношения кассет ИФКН при работе в радиационно-опасной зоне, можно сделать вывод о пригодности данного детектора для прямого измерения поглощенной дозы в биоткани.

Величина поглощенной дозы определяется при этом по формуле:

$$D = A \cdot N,$$

где  $D$  - доза в бэр,<sup>х)</sup>  $N$  - число треков на  $1 \text{ см}^2$  эмульсии,  $A$  - эффективность регистрации нейтронов.

$$A = (1,1 \pm 0,08) \cdot 10^{-4} \text{ бэр/трек/см}^{-2}.$$

Эффективность регистрации нейтронов  $A$  определялась экспериментально путем облучения контрольных пакетов откалиброванным  $\text{Po-Be}$  источником нейтронов. При указанной эффективности месячной предельно-допустимой дозе ( $0,45 \text{ бэр}$ ) соответствует  $4,1 \cdot 10^3$  треков на  $1 \text{ см}^2$  эмульсии.

### III. Техника обработки эмульсии и снятия показаний

Обработка фотоэмульсии производится по стандартной методике, разработанной в НИКФИ для тонких эмульсионных слоев.

Тип проявителя и время проявления выбираются из условия получения оптимальной величины зерен. (В нашей практике используется амидоловый проявитель при времени проявления 5 мин).

х) Биологический эквивалент рентгена.

Для просмотра пленок был использован микроскоп МБИ-3 с увеличением 950 (объектив иммерсионный 60x, окуляр 10x). Диаметр поля зрения при этом - 150 микрон. Счет треков производится по траверсу 150 мкx15 мм (площадь траверса  $0,0225 \text{ см}^2$ ). Одной предельно-допустимой месячной дозе от нейтронов соответствует на данном траверсе 92 трека.

Толщина проявленной пленки после сушки составляет 10 мк. Просмотр по глубине при этом все же необходим, однако он не затруднителен и движение пленки в горизонтальном и вертикальном направлениях производится одновременно. Количество наблюдаемых треков удобно фиксировать, не отрываясь от микроскопа, с помощью электромеханического счетчика. На просмотр 100 пленок тренированный лаборант затрачивает 7 дней. Ошибки метода при определении одной предельно-допустимой месячной дозы приведены в таблице 3.

Т а б л и ц а 3

|   |            |
|---|------------|
| Точность соответствия дозовой кривой  | $\pm 15\%$ |
| Ошибка в определении эффективности по нейтронам Po-Be источника                     | $\pm 7\%$  |
| Статистическая ошибка   | $\pm 11\%$ |
| Средне-квадратичная ошибка при определении одной предельно-допустимой месячной дозы | $\pm 20\%$ |

#### IV. Эффект регистрации тепловых нейтронов и чувствительность к гамма-излучению

Наличие азота в составе ядерных эмульсий обуславливает их чувствительность к тепловым нейтронам. Сечение реакции  $N^{14}(n,p)C^{14}$  на тепловых нейтронах составляет 1,75 барн<sup>171</sup>. С увеличением энергии нейтронов сечение быстро падает по закону  $E^{-1/2}$  и при энергии 200 Кэв становится равным 1,5 мбарн. Энергия протонов данной реакции равна 0,56 Мэв. Расчет показывает, что при облучении тепловыми нейтронами число треков от протонов реакции  $N^{14}(n,p)C^{14}$ , соответствующее одной предельно-допустимой месячной дозе, равно 115 на стандартный траверс  $0,15 \times 15 \text{ мм}^2$  при 92 - для быстрых нейтронов. Небольшое различие этих цифр указывает на возможность использования данного метода для регистрации суммарной дозы от быстрых и тепловых нейтронов.

Сопутствующее нейтронному гамма-излучение обуславливает появление фона из отдельных зерен, при большой плотности которого регистрация треков протонов при просмотре эмульсии может быть затруднена. Опыт, поставленный с гамма-излучением  $Co^{60}$ , показал, что влияние подобного фона становится существенным при дозах облучения в 3-5 р. При дозах свыше 10 р просмотр практически невозможен.

#### У. Влияние регрессии скрытого изображения

Эффект регрессии скрытого изображения в фотоэмульсии, как было показано /8,9/, очень существенен для пленочной дозиметрии. Сильное влияние температуры и влажности окружающего воздуха, неопределенность во времени облучения затрудняют учет регрессии путем введения соответствующих поправок в результаты измерений. В случае индивидуального дозиметрического контроля, когда кассеты с фотоэмульсией могут выдаваться на длительное время (до 1-2 месяцев), достаточная стабильность скрытого изображения является поэтому необходимым условием надежности полученных результатов.

Определение величины регрессии треков протонов отдачи в эмульсии типа К было проведено экспериментально. В летний период, наиболее благоприятный для регрессии, партии пакетов с эмульсией, помещенные в стандартные кассеты ИФК, облучались с интервалами в несколько дней нейтронами от  $Po-Be$  источника до одной и той же величины дозы. По окончании опыта, который продолжался 70 дней, пленки были проявлены одновременно в стандартных условиях. Поскольку регрессия существенно уменьшается при герметизации эмульсионного слоя, для выяснения влияния упаковки эмульсии на величину регрессии параллельно был поставлен такой же эксперимент с эмульсией, завернутой в один слой бумаги. Результаты экспериментов представлены на рис. 3. Из рассмотрения кривых 1 и 2 видно, что в первом случае регрессия не превышала ошибок измерения, во втором случае она значительно больше. Лучшие результаты, полученные с эмульсией, упакованной в пакет и кассету, объясняются, по-видимому, более удовлетворительной герметизацией фотоэмульсии.



### З а к л ю ч е н и е

В результате проведенного исследования возможности применения тонко-слойной ядерной эмульсии типа К, снабженной корректирующим пакетом, для целей индивидуального контроля дозы от быстрых нейтронов показано следующее.

1. Зависимость числа треков в эмульсии от энергии нейтронов в диапазоне энергий от 0,5 до 20 Мэв при изотропном облучении с точностью  $\pm 15\%$  соответствует дозовой кривой для биоткани.

2. Средне-квадратичная ошибка метода при определении одной месячной дозы не превышает для указанного диапазона энергий  $\pm 20\%$ .

3. Величина регрессии скрытого изображения за два месяца не превышает ошибок измерения.

4. Жесткое гамма-излучение ( $Co^{60}$ ) вплоть до дозы в 5 р. не препятствует расшифровке показаний.

5. Производительность просмотра одним лаборантом составляет 85 плёнок за 36-часовую неделю.

Описанная методика применяется в практике индивидуального дозиметрического контроля сотрудников Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

В заключение авторы приносят благодарность сотрудникам НИКФИ А.Ю. Дебердееву, М.Ю. Дебердееву и К.С. Богомолу за предоставление эмульсионной пленки, сотрудникам группы С.И. Любомилова за обработку облученной эмульсионной пленки и В.С. Мартыновой за регулярный просмотр обработанной пленки.

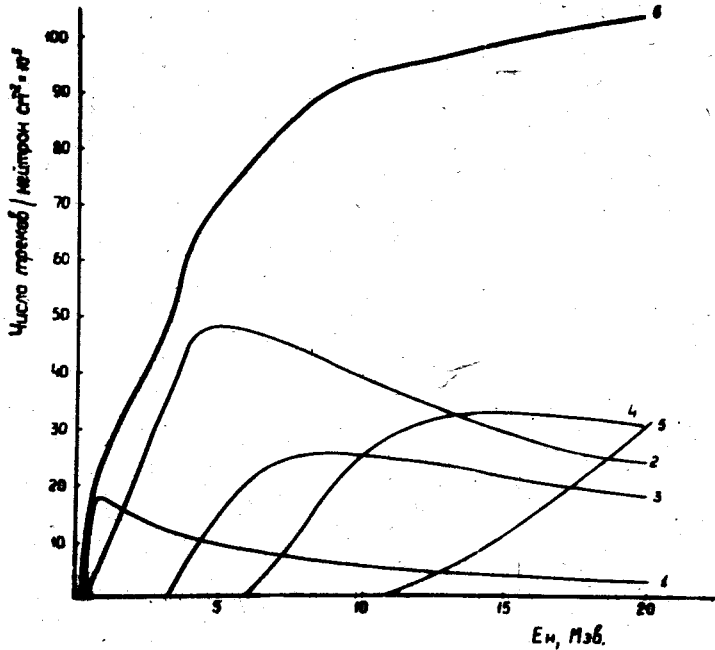


Рис. 1. Зависимость числа треков в эмульсии от энергии нейтронов. Кривые 1, 2, 3, 4, 5 - вклад протонов, образованных в эмульсии (1), в подложке эмульсии (2), в радиаторе толщиной  $13,3 \text{ мгр/см}^2$  (3), в радиаторе толщиной  $34,8 \text{ мгр/см}^2$  (4), в радиаторе толщиной  $58 \text{ мгр/см}^2$  (5). Кривая 6 - полное число треков в эмульсии.

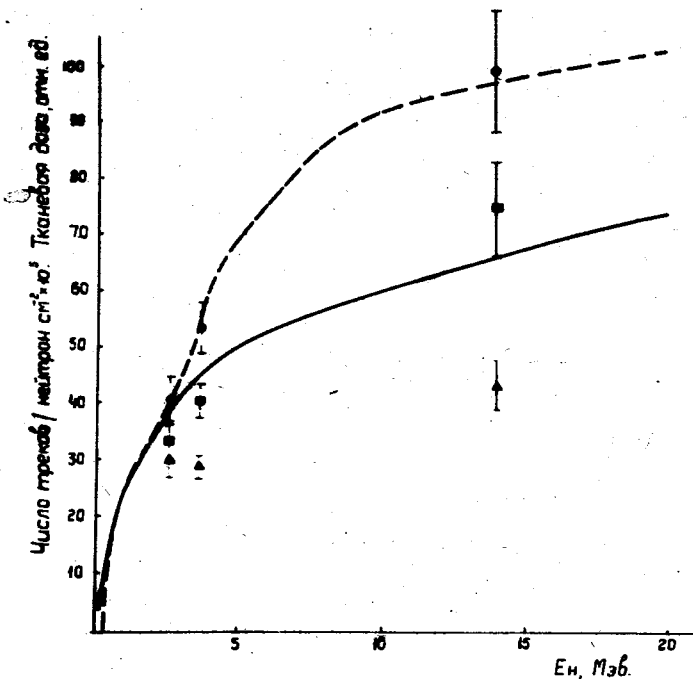


Рис. 2. — дозовая кривая по первому столкновению. - - - - расчетная энергетическая характеристика ядерной эмульсии с корректирующим пакетом.

●, ▲, ■ - экспериментальные точки, полученные соответственно при перпендикулярном, параллельном облучении и облучении вращающейся кассеты нейтронами с энергией 2,5 Мэв, 14 Мэв и нейтронами Рb-Ве источника ( $E_{эфф.} = 3,6 \text{ Мэв}$ ).

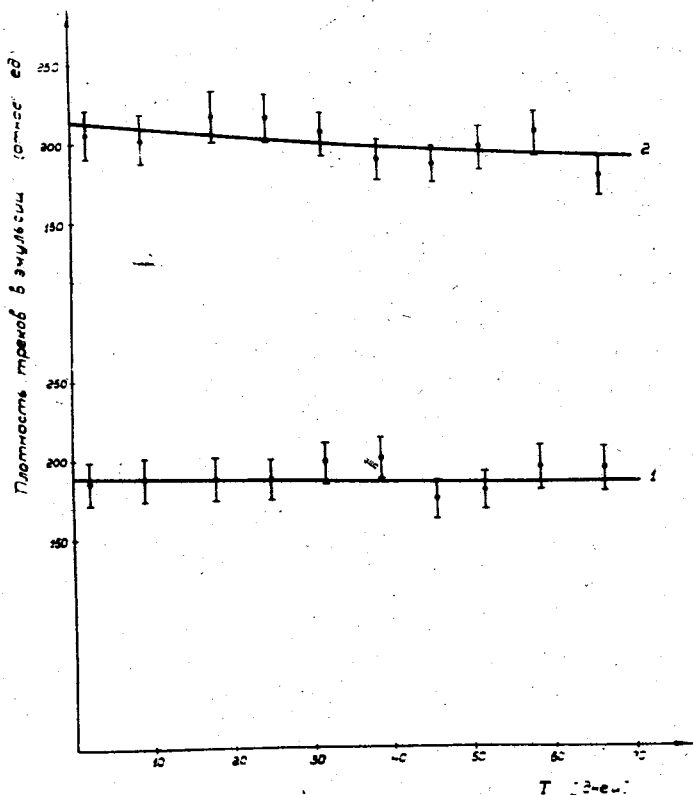


Рис. 3. Регрессия скрытого изображения.

- 1 - для эмульсии с корректирующим пакетом в кассете ИФК.  
 2 - для эмульсии, завернутой в бумагу.

#### Л и т е р а т у р а

1. Сборник работ по некоторым вопросам дозиметрии и радиометрии ионизирующих излучений. 1960 год, стр.106.
2. Сборник работ по некоторым вопросам дозиметрии и радиометрии ионизирующих излучений. 1960 г. стр. 98.
3. J. Cheka. Nucleonics v. 12, N. 6, 1954.
4. К.С.Богомолов и др. Труды ВНИКФИ. Мин.культуры СССР, вып.11(21) стр.58, 1957.
5. G.Hurst, R.Ritchie, U.Wilson. Rev. Sci. Instr. 22, 981 (1951).
6. Херст, Дж.Ритчи Р., Миллис В. Дозиметрия быстрых нейтронов. Сборник докладов Женевской конференции 1955 г.
7. Атлас нейтронных сечений. Атомиздат 1959 г.
8. P.Amadesi, O.Rimondi, H.Sifaki, M.Turtura. Minerva Nucleare v. 4, N. 11, Nov. 1960.
9. J. Cheka. ORNL / 545, Jan. 1950.

Рукопись поступила в издательский отдел  
 15 января 1962 года.