

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

C 329

18-87-670

А.Я.Серов, Б.С.Сычев, Е.П.Череватенко

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
СПЕКТРОВ ЛПЭ В ВОДНОМ ПОГЛОТИТЕЛЕ,
ОБЛУЧАЕМОМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ
НУКЛОНАМИ

1987

Применение пучков нейтронов высокой энергии в радиотерапии ^{/1/} требует всестороннего исследования физических и радиобиологических характеристик этих пучков. Обстоятельно изучены характеристики пучков нейтронов с энергией до 100 МэВ ^{/2-4/}. Однако для нейтронных пучков с энергией в несколько сотен мегаэлектронвольт данные крайне ограничены ^{/5/}.

В настоящей работе приведены некоторые результаты расчетного исследования пространственных распределений дозовых спектров ЛПЭ и закономерностей их формирования в водном поглотителе, облучаемом пучками нейтронов с энергией от 100 до 600 МэВ и протонов с энергией 600 МэВ. В целевой постановке данная работа является продолжением исследований дозовых характеристик пучков высокоэнергетических нейтронов ^{/7/}, генерируемых ускоренными протонами ^{/6/}.

ГЕОМЕТРИЯ РАСЧЕТА

Рассмотрен цилиндрический водный поглотитель толщиной 30 см и радиусом 40 см. Пучок частиц ориентирован нормально к поверхности торца поглотителя. Поперечное сечение пучка - круг с радиусом r_0 , а ось пучка совпадает с осью цилиндра /распределение частиц по площади сечения пучка - равномерное/.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для расчета спектров ЛПЭ в произвольной точке поглотителя исходной информацией являются пространственно-энергетические распределения флюенса первичных и вторичных частиц, которые образуются в результате развития межъядерного каскада в веществе поглотителя. Формализм вычислений пространственно-энергетических распределений флюенса частиц изложен в работе ^{/7/} и реализован в вычислительной программе MEDICA. Эта программа была модернизирована для расчета пространственных распределений спектров ЛПЭ.

Дозовый спектр ЛПЭ $D_i(\vec{r}, L_i(E))$ заряженных частиц типа i в точке \vec{r} однозначно связан с соответствующим действующим энергетическим спектром флюенса $\Phi_i(\vec{r}, E)$:

$$D_i(\vec{r}, L_i(E)) = L_i(E) \Phi_i(\vec{r}, E) \left(\frac{dL_i(E)}{dE} \right)^{-1}, \quad /1/$$

где $L_i(E)$ - ЛПЭ заряженных частиц типа i с энергией E .

Действующие спектры $\Phi_i(\vec{r}, E)$ вычислялись исходя из спектра источника в приближении непрерывного замедления ^{/9/}:

$$\Phi_i(\vec{r}, E) = \frac{1}{L_i(E)} \int d\vec{\Omega} \int_E^{E_{\max}^i} q_i(\vec{r}', \vec{\Omega}, E') \exp\left(-\int_E^{E'} \frac{\Sigma_i(E'')}{L_i(E'')} dE''\right) dE', \quad /2/$$

где E_{\max}^i - максимальная энергия частиц i -го типа в спектре источника; $\Sigma_i(E'')$ - макроскопические сечения неупругого взаимодействия частиц типа i ; $q_i(\vec{r}', \vec{\Omega}, E')$ - спектрально-угловая плотность источников заряженных частиц типа i ; $|\vec{r} - \vec{r}'| = R_i(E') - R_i(E)$, где $R_i(E)$ - средний ионизационный пробег заряженной частицы типа i .

Действующие спектры высокоэнергетических вторичных протонов (p_k), заряженных π -мезонов (π^+ , π^-), электронов и позитронов (e^\pm) определялись непосредственно из результатов расчета межъядерного каскада /см. ^{/7/}/ с использованием соотношения /2/. В используемом формализме не определялись энергетические спектры электронов и позитронов; дозовый спектр ЛПЭ этих частиц задавался в виде гистограммы исходя из флюенса $f_{e^\pm}(\vec{r})$:

$$D_{e^\pm}(\vec{r}, L_{e^\pm}) = \bar{L}_{e^\pm} \frac{f_{e^\pm}(\vec{r})}{\Delta L_{e^\pm}}, \quad /3/$$

где \bar{L}_{e^\pm} - среднее значение ЛПЭ электронов ($\bar{L}_{e^\pm} = 0,2$ кэВ/мкм, $\Delta L_{e^\pm} = 0,02$ кэВ/мкм).

Считалось, что низкоэнергетические заряженные частицы, остаточные ядра отдачи и ядра отдачи кислорода поглощаются локально, в точке их образования. В этом случае выражение /2/ трансформируется в /4/:

$$\Phi_i(\vec{r}, E) = \frac{1}{L_i(E)} \int_E^{E_{\max}^i} q_i(\vec{r}, E') dE'. \quad /4/$$

Действующие спектры низкоэнергетических протонов (p^*) и тяжелых заряженных частиц / d , t , ^3He , α /, образующихся при неупругом взаимодействии адронов с ядрами кислорода, определялись согласно выражению /4/. Спектры источника $q_i(\vec{r}, E')$ рассчитывались следующим образом:

$$q_i(\vec{r}, E') = \sum_{j=n,p,\pi^\pm} \int_{E_1}^{E_{\max}^j} F_j(\vec{r}, E'') \eta^{(0)} \Sigma_j^{(0)}(E'') \frac{dN_i^{(0)}(E', E'')}{dE''} dE'', \quad /5/$$

где $F_j(\vec{r}, E'')$ - пространственно-энергетическое распределение флюенса адронов типа j /см. ^{/7/}/; $\eta^{(0)}$ - массовое содержание

кислорода; $\Sigma_j^{(0)}(E'')$ - макроскопическое сечение неупругого взаимодействия адронов типа j с ядрами кислорода; $\frac{dN_i^{(0)}(E', E'')}{dE''}$ -

энергетический спектр низкоэнергетических частиц типа i , образующихся при взаимодействии адронов с энергией E'' с ядром кислорода; E_1 и E_{\max}^j - минимальная и максимальная энергия в спектрах адронов типа j .

В работе ^{/8/} не учитывался вклад в полную поглощенную дозу остаточных ядер отдачи и ядер отдачи кислорода, которые образуются в результате неупругих и упругих взаимодействий адронов с ядрами кислорода соответственно, поскольку этот вклад в рассматриваемом диапазоне энергий не превышает 5%. Сильно-ионизирующие частицы в значительной степени определяют такие радиобиологические характеристики, как относительная биологическая и кислородная эффективность /ОБЭ и ОКЭ соответственно/, поэтому при расчете суммарных дозовых спектров ЛПЭ необходимо учитывать и эти компоненты поля излучений.

В настоящей работе вычислялись дозовые спектры ЛПЭ ядер отдачи кислорода в упругом нуклон-ядерном рассеянии и остаточных ядер, образующихся в неупругих взаимодействиях первичных нуклонов (f_1) и вторичных адронов (f_2) с ядрами кислорода. Действующие спектры рассчитывались согласно выражению /4/, в котором спектры источника определялись исходя из соотношения /5/. Масса и заряд образующихся остаточных ядер отдачи рассчитывались с учетом типа взаимодействующей частицы и средних множественностей частиц, испускаемых при неупругом взаимодействии адронов с ядрами кислорода ^{/13/}.

Конечным результатом расчетов являются суммарные дозовые спектры ЛПЭ:

$$D_\Sigma(\vec{r}, L) = \sum_i D_i(\vec{r}, L_i(E)). \quad /6/$$

С использованием суммарных дифференциальных спектров ЛПЭ для ряда случаев были также рассчитаны средние значения ЛПЭ ($\bar{L}(\vec{r})$) и интегральные нормированные дозовые спектры ЛПЭ:

$$D_{int}(\vec{r}, L) = \frac{1}{D_{\Sigma}(\vec{r})} \int_{L_{min}}^L D_{\Sigma}(\vec{r}, L') dL', \quad /7/$$

где $D_{\Sigma}(\vec{r})$ - полная поглощенная доза в точке \vec{r} ; L_{min} - минимальное значение ЛПЭ в спектре ЛПЭ.

КОНСТАНТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

• В качестве исходной информации по сечениям неупругого и упругого взаимодействий использовались данные /11,12/. Дважды дифференциальные распределения высокоэнергетических вторичных частиц рассчитывались согласно /10/. Энергетические спектры низкоэнергетических нуклонов и тяжелых заряженных частиц вычислялись по алгоритму /13/. Энергетический спектр остаточных ядер отдачи рассчитывался на основании результатов моделирования внутриядерного каскада методом Монте-Карло, приведенных в работе /14/. Энергетические распределения ядер отдачи кислорода определялись исходя из аналитического представления дифференциальных сечений рассеяния нуклонов на атомных ядрах /12/. Значения ЛПЭ заряженных частиц и ядер отдачи в зависимости от их энергии, а также производной $dL_1(E)/dE$ рассчитывались по программе DEDXR /15/.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис.1-8 приведены суммарные и парциальные дозовые спектры ЛПЭ в водном поглотителе, облучаемом моноэнергетическими нейтронами с энергией 100, 350, 600 МэВ и протонами с энергией 600 МэВ. Данные представлены в цилиндрической системе координат r и z для различных толщин поглотителя как в зоне $r/r_0 = 5$ см/, так и вне зоны пучка. На приведенных графиках по оси ординат отложена величина $LD(L)$, представляющая поглощенную дозу на интервале $\ln L$.

Как видно из представленных данных, с ростом энергии нейтронов происходит расширение спектров ЛПЭ как в сторону низких, так и в сторону высоких значений ЛПЭ. Спектры ЛПЭ можно условно разделить на 4 части: при значениях ЛПЭ до 2 кэВ/мкм спектры определяются высокоэнергетическими протонами, π -мезонами и электронами; в диапазоне ЛПЭ от 2 до 95 кэВ/мкм основной вклад дают низкоэнергетические протоны, дейтроны, тритоны; в диапазоне от 95 до 220 кэВ/мкм определяющий вклад ядер ^3He и ^4He ; при ЛПЭ более 220 кэВ/мкм спектры

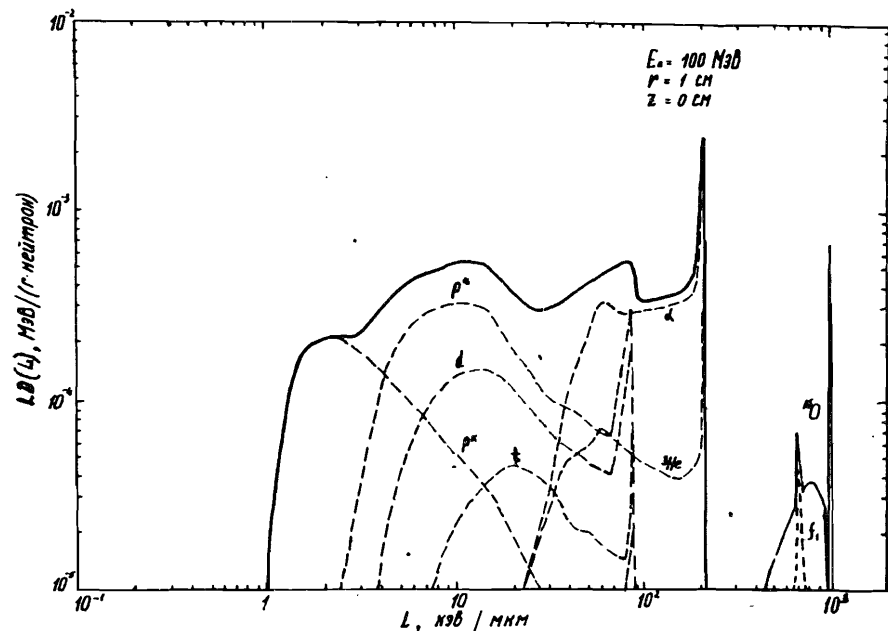


Рис.1. Дифференциальные парциальные /----/ и суммарные /—/ спектры ЛПЭ в водном поглотителе / $r=1$ см, $z=0$ см/, облучаемом нейтронами с энергией 100 МэВ.

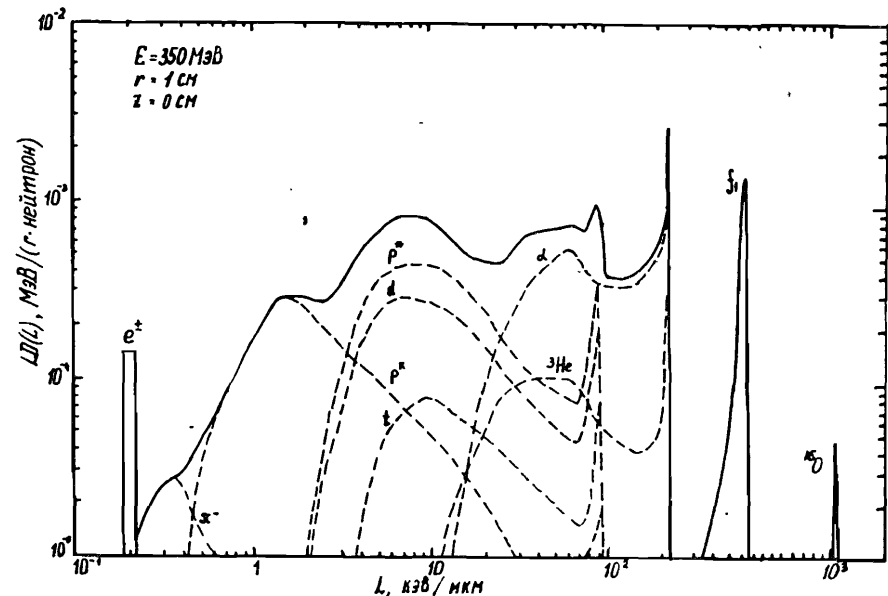


Рис.2. То же, что на рис.1, для нейтронов с энергией 350 МэВ.

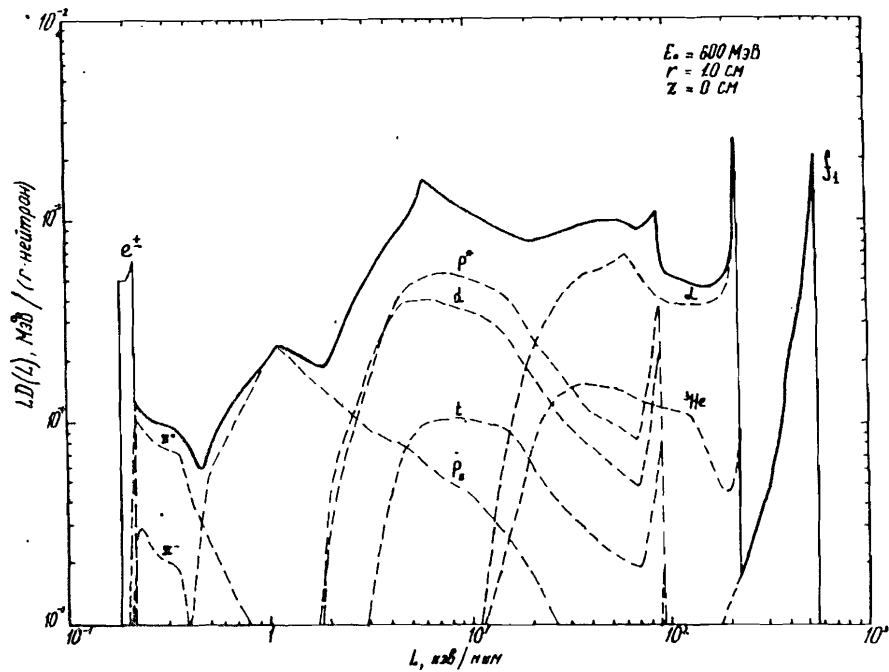


Рис.3. То же, что на рис.1, для нейтронов с энергией 600 МэВ.

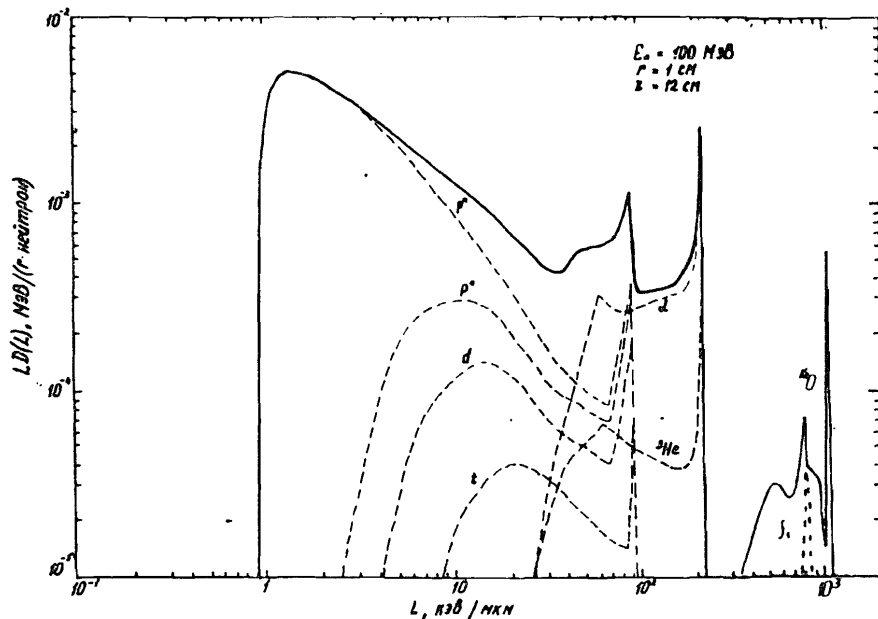


Рис.4. То же, что на рис.1, для нейтронов с энергией 100 МэВ / $r = 1$ см, $z = 12$ см/.

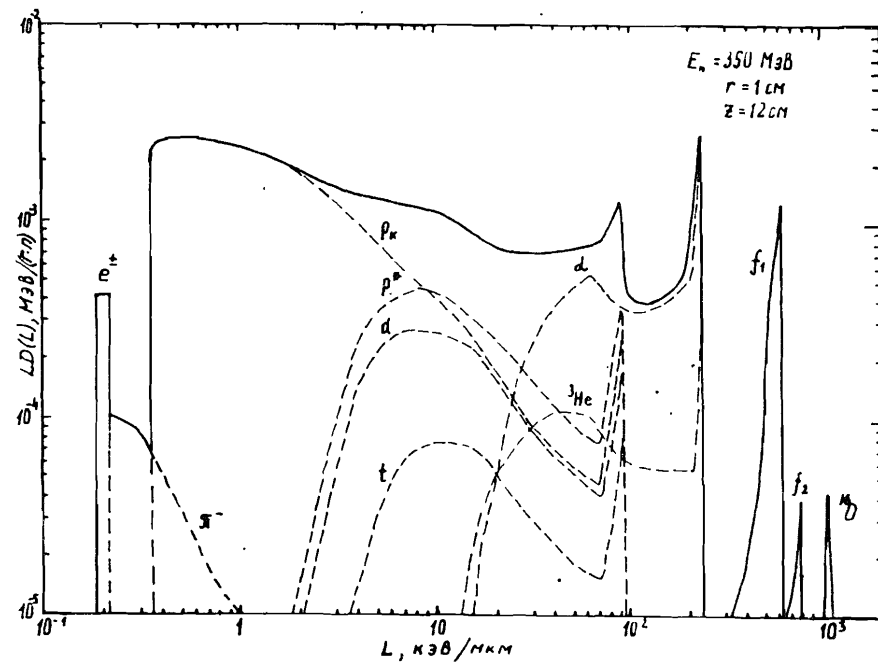


Рис.5. То же, что на рис.1, для нейтронов с энергией 350 МэВ / $r = 1$ см, $z = 12$ см/.

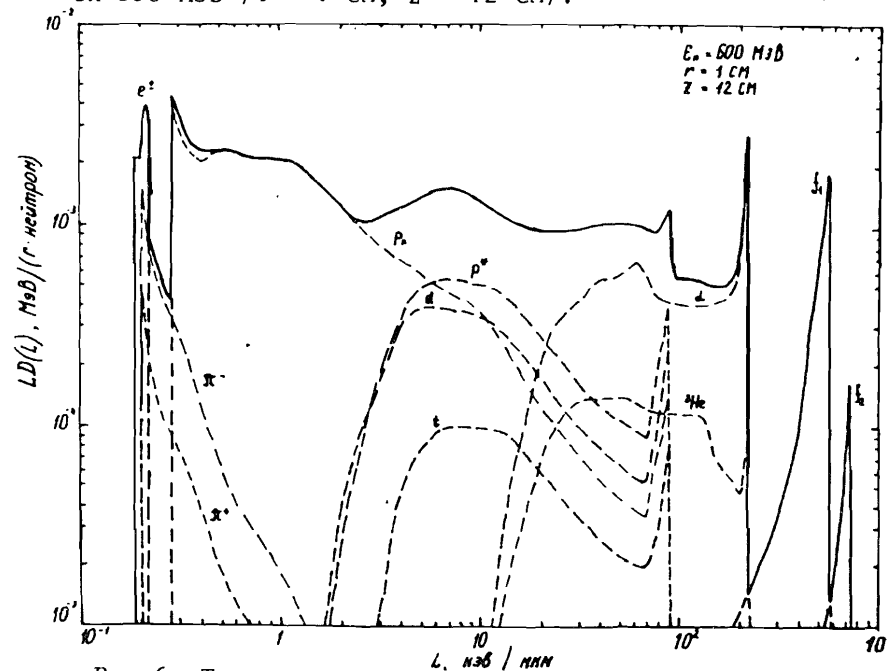


Рис.6. То же, что на рис.1, для нейтронов с энергией 600 МэВ / $r = 1$ см, $z = 12$ см/.

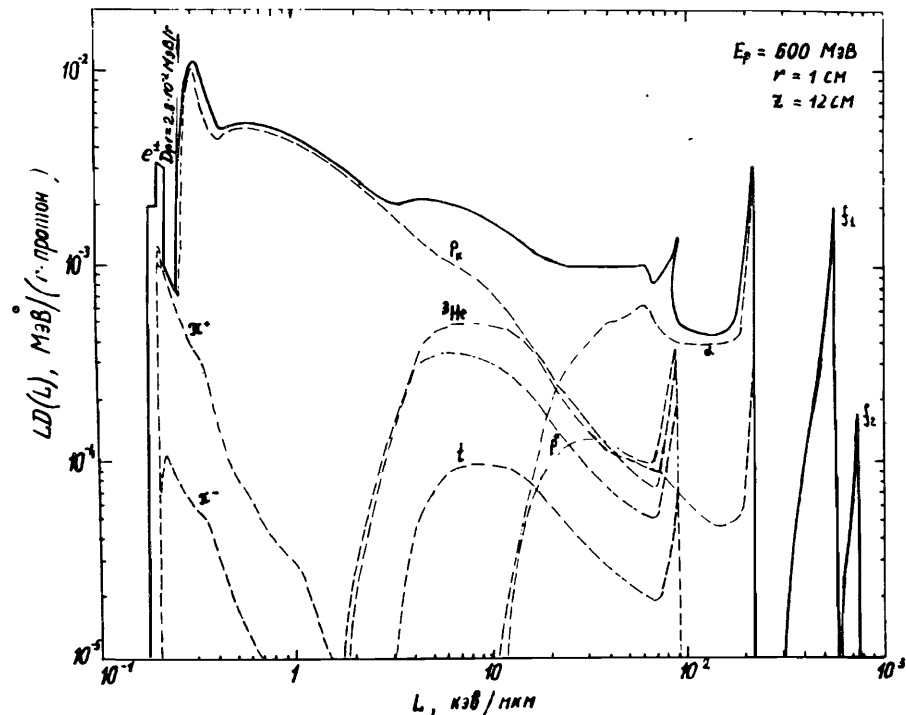


Рис.7. То же, что на рис.1, для протонов с энергией 600 МэВ /r = 1 см, z = 12 см/.

определяются остаточными ядрами и ядрами кислорода. С увеличением энергии нейтронов уменьшается вклад ядер отдачи кислорода и увеличивается вклад остаточных ядер отдачи.

Спектры ЛПЭ на входе в поглотитель /z = 0/ существенно отличаются от спектров в максимуме дозного распределения /z = 12 см/ /7/. Это отличие обусловлено тем, что формирование спектров ЛПЭ на входе определяется сильноионизирующими частицами в существенно большей степени, чем на глубине 12 см. В то же время по мере удаления от входа возрастает вклад в спектры высокоэнергетических протонов. Этим объясняется тот факт, что среднее значение ЛПЭ (\bar{L}) на входе существенно больше \bar{L} на глубине 12 см. Так, для $E_n = 350$ МэВ $\bar{L}(r = 1 \text{ см}, z = 0 \text{ см}) = 68$ кэВ/мкм, а $\bar{L}(r = 1 \text{ см}, z = 12 \text{ см}) = 36$ кэВ/мкм.

В таблице приведены интегральные нормированные дозовые спектры ЛПЭ /см.выражение /7// и средние значения ЛПЭ.

Таблица

Интегральные нормированные дозовые спектры ЛПЭ /см. выражение /7// и средние значения ЛПЭ

L, кэВ/мкм	$E_n = 100$ МэВ		$E_n = 350$ МэВ			$E_n = 600$ МэВ		$E_n = 600$ МэВ
	r=1 см	r=1 см	r=1 см	r=1 см	r=8,5 см	r=1 см	r=1 см	r=1 см
	z=0 см	z=12 см	z=0 см	z=12 см	z=12 см	z=0 см	z=12 см	z=12 см
0,4	0	0	0,01	0,04	0,04	0,04	0,20	0,65
0,7	0	0	0,02	0,23	0,14	0,05	0,30	0,67
1	0,01	0,15	0,05	0,30	0,24	0,06	0,36	0,70
2	0,05	0,38	0,08	0,49	0,44	0,10	0,49	0,72
4	0,14	0,60	0,15	0,55	0,63	0,19	0,58	0,75
7	0,24	0,71	0,26	0,65	0,75	0,30	0,64	0,79
10	0,32	0,78	0,33	0,69	0,84	0,40	0,69	0,82
20	0,50	0,82	0,50	0,77	0,90	0,56	0,78	0,87
40	0,61	0,84	0,67	0,84	0,93	0,65	0,83	0,92
70	0,72	0,88	0,78	0,89	0,96	0,78	0,89	0,97
100	0,78	0,94	0,88	0,92	0,98	0,86	0,92	0,99
200	0,96	0,98	0,98	0,97	0,99	0,91	0,96	0,99
400	0,97	0,98	0,98	0,98	1,00	0,96	0,98	1,00
700	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00	0,99	0,99	1,00
1000	1	1	1	1	1	1	1	1
\bar{L} , кэВ/мкм	68	22	68	36	11	54	33	7

Как следует из представленных данных, наиболее низкие значения \bar{L} для первичных протонов, а наиболее высокие - для нейтронов с энергией 350 МэВ.

Проведенное исследование позволило выявить основные закономерности формирования дозовых спектров ЛПЭ в водном поглотителе, облучаемом нейтронами и протонами с энергией от 100 МэВ до 600 МэВ.

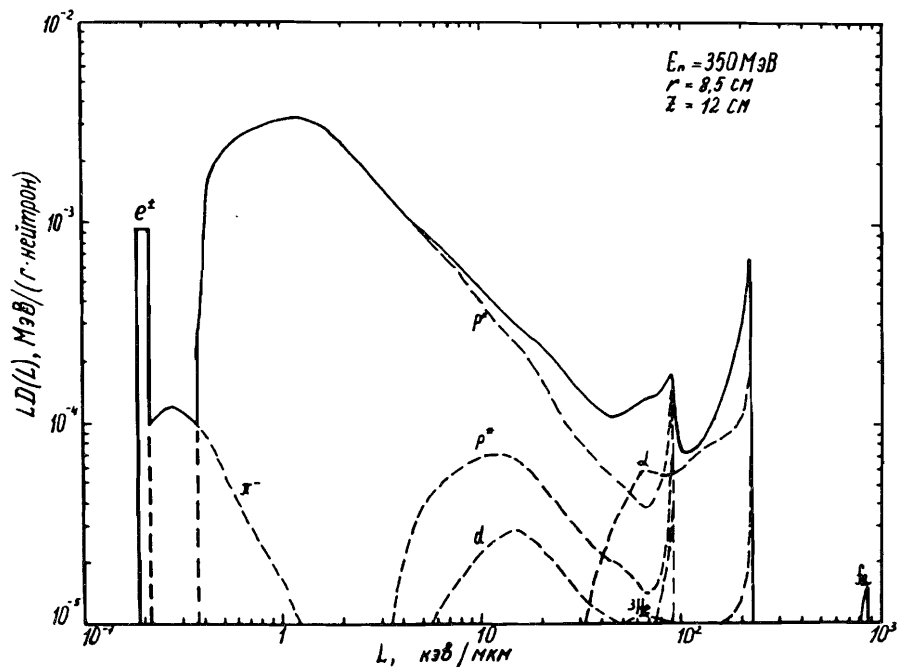


Рис.8. То же, что на рис.1, для нейтронов с энергией 350 МэВ / $r = 8,5$ см, $z = 12$ см/.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джелепов В.П. и др. - Медицинская радиология, 1980, 3 с.56.
2. Amols H.I. et al. - Medical Physics, 1977, v.4, N 6, p.486.
3. Harrison G.H. et al. - Radiation Research, 1978, v.74, p.1.
4. Bhatia D.P. and Nagarajan P.S. - Phys.Med.Biol., 1979, v.24, N 5, p.940.
5. Morstin K. et al. EIR-Bericht, 1986, N 594.
6. Серов А.Я., Сычев Б.С., Череватенко Е.П. ОИЯИ, 18-80-540, Дубна, 1980.
7. Серов А.Я. и др. ОИЯИ, 18-83-53, Дубна, 1983.
8. Серов А.Я. и др. - Атомная энергия, 1984, т.56, с.36.
9. Сычев Б.С. ОИЯИ, Р9-3269, Дубна, 1967.
10. Серов А.Я., Сычев Б.С. - Труды РТИ АН СССР, М., 1973, № 14, с.183.

11. Сычев Б.С., Калмыков А.Р., Отрощенко Е.А. Препринт РТИ АН СССР, М., 1983, № 18.
12. Сычев Б.С. Известия АН БССР, серия физ.-энерг.наук, 1986, № 4, с.13.
13. Сычев Б.С., Серов А.Я., Манько Б.В. Препринт РТИ АН СССР, М., 1979, № 799.
14. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Взаимодействие высокоэнергетических частиц и атомных ядер с адронами. М.: Атомиздат, 1972.
15. Steward P.G. California University, UCRL - 18127, 1968.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 сентября 1987 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

- | | | |
|----------------|---|------------|
| D7-83-644 | Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983. | 6 р.55 к. |
| D2,13-83-689 | Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983. | 2 р.00 к. |
| D13-84-63 | Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983. | 4 р.50 к. |
| D2-84-366 | Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984. | 4 р.30 к. |
| D1,2-84-599 | Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984. | 5 р.50 к. |
| D10,11-84-818 | Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983. | 3 р.50 к. |
| D17-84-850 | Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984./2 тома/ | 7 р.75 к. |
| D11-85-791 | Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985. | 4 р.00 к. |
| D13-85-793 | Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985. | 4 р.80 к. |
| D4-85-851 | Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985. | 3 р.75 к. |
| D3,4,17-86-747 | Труды V Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986. | 4 р.50 к. |
| | Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. /2 тома/ | 13 р.50 к. |
| D1,2-86-668 | Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. /2 тома/ | 7 р.35 к. |
| D9-87-105 | Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. /2 тома/ | 13 р.45 к. |
| D7-87-68 | Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986 | 7 р.10 к. |
| D2-87-123 | Труды Совещания "Ренормгруппа-86". Дубна, 1986 | 4 р.45 к. |

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.

Серов А.Я., Сычев Б.С., Череватенко Е.П.

18-87-670

Пространственное распределение спектров ЛПЭ в водном поглотителе, облучаемом высокоэнергетическими нуклонами

С целью интерпретации результатов радиобиологических и дозиметрических исследований на терапевтическом пучке нейтронов высоких энергий фазотрона ЛЯП ОИЯИ выполнены расчеты дозовых спектров ЛПЭ в водном поглотителе, облучаемом пучками нейтронов с энергией от 100 до 600 МэВ и протонами с энергией 600 МэВ. Расчеты выполнены с помощью модернизированной программы MEDICA, вычисляющей в произвольной точке поглотителя пространственно-энергетические распределения флюенса первичных и вторичных частиц, образующихся в результате развития межъядерного каскада в веществе поглотителя. Значения ЛПЭ заряженных частиц и ядер отдачи в зависимости от их энергии рассчитывались по программе DEDXR. Приведены суммарные и парциальные дозовые спектры ЛПЭ для различных толщин водного поглотителя в зоне и вне зоны пучка. Расчеты показывают, что с ростом энергии нейтронов происходит расширение спектров как в сторону низких, так и высоких значений ЛПЭ. Среднее значение ЛПЭ на глубине 12 см водного поглотителя имеет наибольшую величину при энергии нейтронов 350 МэВ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Serov A.Ya., Sychev B.S., Cherevatenko E.P.

18-87-670

LET Spectrum Spatial Distribution in Water Absorber Exposed to High Energy Nucleons

The calculations of the LET dose spectra in water absorber exposed to neutron beams having energies from 100 to 600 MeV and to 600 MeV protons have been carried out with the aim to interpret results of radiobiological and dosimetric investigations on therapeutical neutron high energy beam of JINR Nuclear Problems Laboratory. The calculations have been carried out using modernized computer program MEDICA calculating in arbitrary point of absorber spatial and energy distribution of primary and secondary particles fluence generated as a result of internuclear cascade development in absorber material. The LET values of charged particles and recoils, depending upon their energy, have been calculated using the computer program DEDXR. The total and partial LET dose spectra for different thicknesses of water absorber within the beam zone and out of one are demonstrated. The calculations show that under growth neutron energy the widening of spectra takes place either in the direction of low or high LET values. The LET value average for 12 cm depth of water absorber has the largest one under 350 MeV neutron energy.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987