

**РАСЧЕТ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В ПОЛУБЕСКОНЕЧНОЙ СРЕДЕ
ОТ ТОЧЕЧНОГО ИЗОТРОПНОГО ИСТОЧНИКА С ОТРАЖАТЕЛЕМ**

Ю. П. ПАХОМОВ, Г. Ш. ПЕКАРСКИЙ

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института
электронной микроскопии)

В настоящее время нашли широкое распространение нейтронные методы каротажа, измерения влажности, определения элементного состава веществ и т. д. Поскольку основные характеристики этих методов (чувствительность, производительность, глубинность и т. д.) определяются величиной и пространственным распределением потока нейтронов в исследуемом объеме вещества, в ряде работ проведены исследования распределения потока нейтронов в зависимости от параметров среды и спектра нейтронов источника [1—4].

Сложность учета граничных условий и энергетической зависимости сечений взаимодействия ограничила имеющиеся теоретические исследования рассмотрением бесконечной среды [1—3], либо полубесконечной среды и мононаправленного источника [4].

Ввиду того, что в ряде работ [5, 6] получено существенное влияние отражателя нейтронов, его материала и размеров на величину и распределение потока нейтронов, нами проводилось исследование влияния параметров точечного изотропного источника (спектра нейтронов, наличия отражателя и его размеров, параметров среды (влажность) на величину и пространственное распределение потока тепловых нейтронов в полубесконечном объеме грунта.

Исследования проводились для нейтронов спектра Pu—Be, Pu—LiF-источников и нейтронов с энергией 14 Мэв. В качестве исследуемой среды используется песок (двуокись кремния) с минералогической плотностью $2,65 \text{ г/см}^3$ и пористостью $\sim 40\%$. Влияние влажности оценивалось для малой (4 об.%) и полной влагонасыщенности среды.

Максимальные размеры отражателя (радиус и высота) принимались равными двум длинам свободного пробега нейтронов источников, что обеспечивает достаточно полное использование обратно рассеянных нейтронов. В качестве отражателя использована вода. Источник расположен на нижней поверхности по оси цилиндрического отражателя на высоте 10 см над поверхностью среды.

Определение потока тепловых нейтронов в указанной геометрии проводилось путем расчета переноса нейтронов методом Монте-Карло. Программа расчета состоит из двух частей: расчета замедления быстрых нейтронов и расчета диффузии тепловых нейтронов. В расчетах используются многогрупповые константы работы [7]. Они охватывают практически весь диапазон изменения энергии нейтронов от тепловых до 10,5 Мэв. Сечение взаимодействия для нейтронов с энергией более 10,5 Мэв аппроксимировалось групповым сечением в диапазоне

6,5÷14 Мэв, используя данные работ [8, 9]. Для уменьшения статистической погрешности расчета потока нейтронов в расчете используется одна из модификаций метода Монте-Карло, заключающаяся в аналитическом осреднении процесса поглощения [10]. При расчете замедления учет потери энергии производился лишь в упругих столкновениях [1—2]. Расчет анизотропии рассеяния проводился в транспортном приближении за исключением водорода, на котором анизотропия рассеяния учитывалась точно.

Оценка потока тепловых нейтронов производилась по числу столкновений тепловых нейтронов. Все расчетные результаты нормированы к нейтронному источнику, испускающему изотропно 1 нейтр/сек в полный телесный угол и для наглядности представлены в виде плавных кривых, полученных на основе гистограмм. Представленные на графиках результаты усреднены по следующим объемам: для распределений потока тепловых нейтронов по глубине — в пределах 0÷10 см по радиусу от оси, совпадающей с осью источника, и в пределах глубины $h \div h+5$ см для распределений по радиусу в пределах глубины 0÷5 см (у поверхности) и по радиусу в пределах $r \div r+10$ см.

На рис. 1 приведены результаты расчетов потока тепловых нейтронов по глубине при влажности среды $W=4$ об.% и высоте расположения источника $H=10$ см над поверхностью среды. Пунктиром обозначены данные для источников без отражателя, сплошные кривые — для источников с отражателем. Аналогичные результаты для $W=40$ об.% приведены на рис. 2.

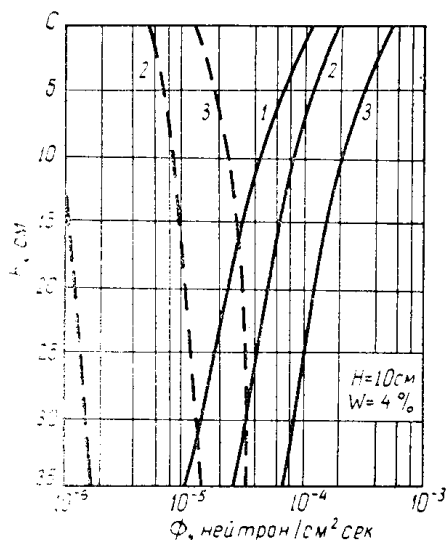


Рис. 1. Распределение потока тепловых нейтронов по глубине для песка с влажностью 4 об. %. Пунктирные линии — источник без отражателя, сплошные — с отражателем. Цифры у кривых: 1 — нейтронный генератор с энергией 14 мэв, 2 — Pu—Be-источник, 3 — Pu—LiF-источник.

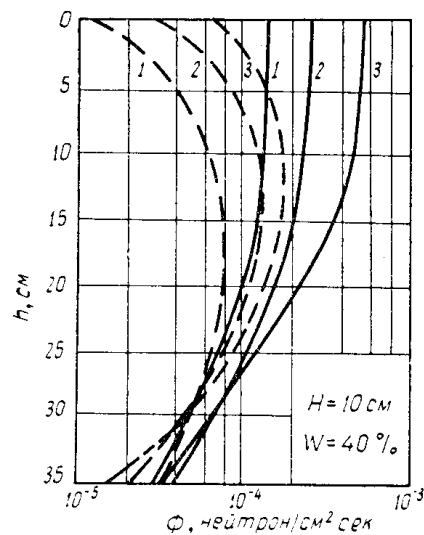


Рис. 2. Распределение потока тепловых нейтронов по глубине для песка с влажностью 40 об. %. Обозначения те же, что на рис. 1.

Данные по радиальному распределению потока тепловых нейтронов для источников с отражателем, расположенных на высоте 10 см, представлены на рис. 3. Пунктиром обозначены кривые для влажности среды $W=4$ об.% и сплошные — для $W=40$ об.%. Аналогичные ре-

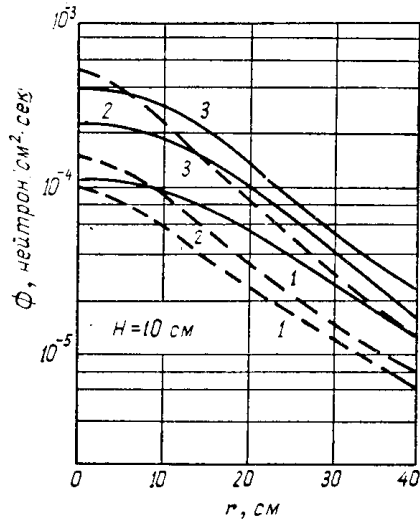


Рис. 3. Распределение потока тепловых нейтронов в песке по радиусу от источников с отражателем. Пунктирные линии — влажность 4 об.%, сплошные — 40 об.%. Цифры у кривых: 1 — нейтронный генератор с энергией 14 мэв, 2 — Pu—Be-источник, 3 — Pu—LiF-источник.

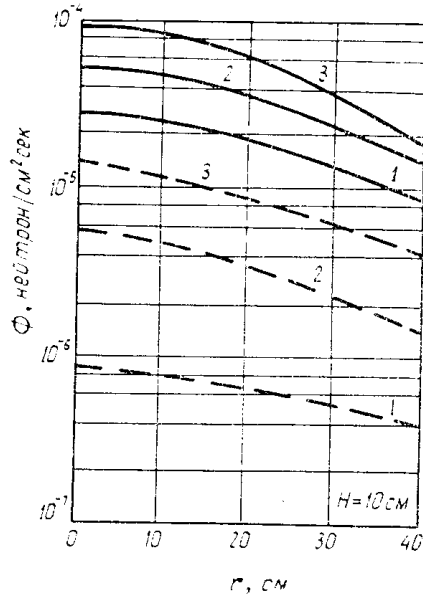


Рис. 4. Распределение потока тепловых нейтронов в песке по радиусу от источников без отражателя. Обозначения те же, что и на рис. 3.

зультаты для нейтронных источников без отражателя приведены на рис. 4.

Из полученных результатов следует:

1. Применение отражателя позволяет значительно увеличить поток тепловых нейтронов в полубесконечной среде. При этом:

а) для малой влагонасыщенности влияние отражателя более существенно. Так, для глубины 20 см поток нейтронов увеличивается для нейтронного генератора в 20 раз, для Pu—Be-источника — в 5 раз, для Pu—LiF-источника — в 4 раза, а при влажности 40 об. % поток увеличивается соответственно в 1,2, 1,4 и 1,5 раза;

б) из исследованных источников наибольший поток тепловых нейтронов на малых глубинах обеспечивает Pu—LiF-источник (в расчете на один нейтрон источника);

в) использование отражателя существенно изменяет характер распределения потока тепловых нейтронов по глубине.

2. Спектр нейтронов источника существенно влияет на распределение потока тепловых нейтронов в среде. При этом:

а) для малой влагонасыщенности увеличение потока в среде особенно существенно и составляет для среды с $W=4$ об. % на глубине 20 см по отношению к потоку, создаваемому нейтронным генератором для Pu—Be-источника — в 10 раз, для Pu—LiF-источника — в 26 раз;

б) даже для полной влагонасыщенности ($W=40$ об. %) поток на глубине 20 см увеличивается соответственно в 1,4 и 1,9 раза.

3. Радиальное распределение потока тепловых нейтронов с применением отражателя позволяет значительно увеличить поток тепловых нейтронов в пределах локального объема, расположенного под источником.

Для исследования влияния тепловых и быстрых нейтронов из отражателя на величину потока и его форму распределения в среде были проведены расчеты для различных размеров отражателей, а также для отражателя, экранированного кадмием с толщиной, обеспечивающей полное поглощение тепловых нейтронов. На рис. 5 представлены результаты расчетов распределения потока тепловых нейтронов по глубине при влажности среды $W=4$ об. % и высоте расположения источника $H=10$ см.

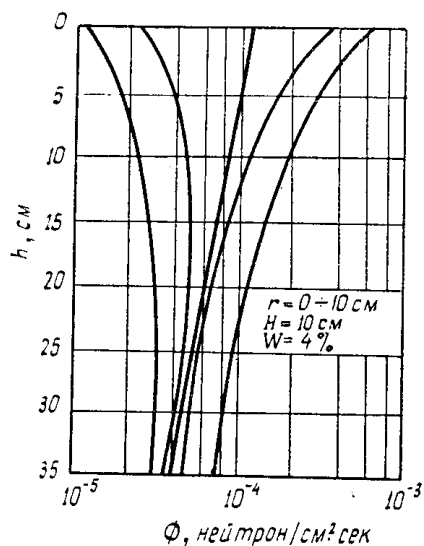


Рис. 5. Влияние размеров отражателя на распределение потока тепловых нейтронов по глубине. Цифры у кривых, диаметр и толщина цилиндрического отражателя: 1 — $20 \times 7,5$, 2 — 15×5 , 3 — 20×3 , 4 — $20 \times 7,5 + \text{Cd}$, 5 — без отражателя.

Анализ результатов показывает:

1. Основной вклад в увеличение потока тепловых нейтронов в среде обусловлен тепловыми нейтронами отражателя. Величина вклада определяется размерами отражателя.

2. Применение отражателя в кадмиевом экране позволяет получить распределение потока по глубине, характер которого сходен с распределением от источника без отражателя. Увеличение потока обусловлено быстрыми и промежуточными нейтронами отражателя, имеющими более мягкий спектр, чем спектр источника. Вследствие этого максимум распределения по глубине смещен к поверхности. Для отражателя диаметром $20 \times 7,5$ см в кадмиевом экране увеличение потока в максимуме распределения по глубине составляет $\sim 30\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Денисик и др. В сб.: «Портативные генераторы нейтронов в ядерной геофизике». М., Атомиздат, 1962.
2. Р. А. Резванов и др. В сб.: «Прикладная геофизика». Вып. 5. М., «Недра», 1968.
3. В. Н. Стариков, Ф. Х. Еникеева. Распределение медленных нейтронов в однородном водородосодержащем песчанике. «Атомная энергия», вып. 3, 1969, т. 27, стр. 219.
4. Munnatt F. R. et al. „Nuclear Tecnology, vol. 12 nov. 1971, p. 329—331.
5. В. А. Емельянов. Полевая радиометрия влажности и плотности почвогрунтов. М., Атомиздат, 1970.
6. В. И. Фоминых, О. А. Мигуньков. Направленный излучатель тепловых нейтронов. «Атомная энергия», вып. 6, 1971, т. 31, стр. 624.
7. Л. П. Абагян и др. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1964.
8. Б. Р. Бергельсон и др. Многогрупповые константы для расчета ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1970.
9. Н. Л. Власов. Нейтроны. Изд. 2-е. М., «Наука», 1971.
10. Н. П. Бусленко и др. Метод статистических испытаний. М., Физматгиз, 1962.