

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОСЛАБЛЕНИЯ НЕЙТРОННОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЙ КОМПОЗИЦИЯМИ НА ОСНОВЕ ГИДРИДА ТИТАНА

*Р.Н. Ястребинский, В.И. Павленко, Н.И. Черкашина, О.В. Курьева*  
*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,*  
*Белгород, Россия*  
*E-mail: yrndo@mail.ru*

Дана оценка возможности применения композиционных материалов на основе гидрида титана в биологической защите транспортных ядерных энергетических установок. Проведены теоретические расчеты и экспериментальные исследования характеристик ослабления нейтронного и гамма-излучений композициями на основе гидрида титана. На основании полученных нейтронных и гамма-полей рассчитаны величины длин релаксации для плотности потока быстрых нейтронов и мощности дозы гамма-квантов в исследуемых материалах для областей с установившимся равновесным спектром. Установлено, что кратности ослабления нейтронного и гамма-излучений зависят от их спектров на передней границе исследуемого материала. Эти спектры формируются материалами конструкций, находящимися перед исследуемыми материалами.

### ВВЕДЕНИЕ

Характерной чертой атомных подводных лодок (АПЛ) нового поколения является энергетическая установка нового типа, имеющая интегральное моноблочное исполнение, при котором сам реактор и его первый контур охлаждения монтируются в едином корпусе. Этим обеспечивается малошумность АПЛ и увеличивается общий КПД ядерной энергетической установки (ЯЭУ). Подобная паропроизводящая установка намного компактнее предыдущего поколения, более проста в обслуживании, более безопасна и надежна. В то же время интеграция всех систем и узлов реактора в едином корпусе негативно сказывается на ремонтпригодности установки ввиду их низкой доступности. Трудности, связанные с обеспечением радиационной безопасности ЯЭУ, обусловлены невысокими прочностными и эксплуатационными характеристиками конструкции биологической защиты, неразборностью и сложностью технологии монтажа, что увеличивает ее стоимость.

В биологической защите реакторов транспортных ЯЭУ, в том числе реакторов АПЛ, широкое применение нашли материалы на основе полимеров и в первую очередь полиэтилена. Благодаря высокому содержанию водорода он эффективно ослабляет нейтронное излучение. Однако при этом имеет относительно низкую температуру эксплуатации (60...80 °С).

Полипропилен обладает более высокой теплостойкостью и прочностью по сравнению с полиэтиленом. Полипропилен более стоек к воде, его водопоглощение и паропроницаемость ниже, чем у полиэтилена. В отличие от последнего он, по литературным данным [1], может длительное время эксплуатироваться при температурах 130...140 °С. Известны композиции полипропилена, наполненные порошкообразным графитом [2, 3], композиции полипропилена и сополимера пропилена с этиленом, наполненные нитридом бора (БНС-17-1, БНС-17-2, БНС-18-1, БНС-18-2 [ТУ 2243-032-05796653-97]).

Однако температура эксплуатации данных композитов ограничивается 230 °С, что не удовлетворяет условиям эксплуатации транспортных ЯЭУ, где рабочая температура защиты реактора составляет 300...350 °С. Кроме того, полипропилен достаточно сложен в переработке.

Известны зарубежные аналоги на основе полиэтилена низкого давления (ПЭНД) с 5% содержанием элементарного бора (Quadrant Engineering Plastic Products (г. Гилт, Бельгия)). Данный материал обеспечивает защиту от проникающей радиации, однако подвержен значительному температурному старению в области 250...300 °С. Компаунды LNP Thermocomp HSG на основе нейлон-6, армированного вольфрамом (компания GE Plastics (Нидерланды)), обладают высокими показателями жесткости и ударпрочности. При этом компаунды не удовлетворяют условиям эксплуатации транспортных ЯЭУ ввиду наличия газовой выделенности и дефектов структуры при длительном облучении.

В связи с этим, поиск и внедрение материалов защиты, обладающих более высокой термической и радиационной стойкостью, имеют большое практическое значение для новых разработок (проект) ЯЭУ АПЛ [4].

Гидрид титана является наиболее перспективным материалом биологической защиты транспортных ЯЭУ нового поколения благодаря высоким защитным характеристикам по отношению к нейтронному излучению [5]. В сравнении с наполненными полимерами гидрид титана имеет более высокие температуры эксплуатации и допустимый флюенс нейтронов.

На основе гидрида титана в настоящее время разработаны и внедрены в промышленность четыре материала: брикетированный гидрид титана, порошок гидрида титана, крошка гидрида титана и компактный гидрид титана. Брикетированный гидрид титана и крошка гидрида титана имеют

низкую температуру эксплуатации (до 200 °С), что ограничивает их использование в защите ЯЭУ. Применяемый компактный гидрид титана (ГТК), получаемый методом сквозного насыщения титановых заготовок водородом, имеет более высокую термическую и радиационную стойкость. Однако он не поддается механической обработке, в результате чего при формировании блоков защиты возникает необходимость в заполнении образующихся зазоров и полостей материалом на основе крошки гидрида титана и связующего порландцемента (ПЦ). Образующаяся композиция (ГТК-ПЦ) содержит до 5% мелкой пылевидной фракции (менее 0,2 мм), которая является пожаро- и взрывоопасной, а также основным источником выделения водорода при высоких рабочих температурах эксплуатации.

В связи с этим авторами разработан конструкционный материал на основе дробы гидрида титана (КДГТ), позволяющий упростить технологию монтажа защиты ЯЭУ, улучшить ее качество и снизить стоимость. Проведенные испытания показали, что гидрид титана в виде дробы более прочен, не имеет микротрещин, не растрескивается в процессе работы, не образует мелкой взрывоопасной фракции и имеет более высокую температуру эксплуатации. Термостойкость дробы позволит использовать материалы биологической защиты на основе КДГТ в условиях температурного режима 300...350 °С, непосредственно возле корпуса реактора. Модифицирование дробы борсодержащими материалами, с возможным их остекловыванием на поверхности, позволит повысить термическую устойчивость композитов и обеспечит более жесткие условия эксплуатации защиты при температуре 450...500 °С [6].

Целью работы являлась оценка возможности применения разработанных материалов в биологической защите транспортных ЯЭУ. Проведены теоретические расчеты и экспериментальные исследования характеристик ослабления нейтронного и гамма-излучений композициями на основе гидрида титана.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В реальных компоновках защиты водородосодержащим материалам чаще всего предшествуют материалы на основе стали или свинца. В связи с этим рассматривалось два типа композиций.

В композициях первого типа перед исследуемым материалом располагается сталь. Состав композиций: активная зона (85 см), железобетонный отражатель (20 см), стальной корпус реактора (12,5 см), исследуемый материал (150 см).

В композициях второго типа перед исследуемым материалом располагается свинец. До корпуса реактора включительно состав композиций второго типа аналогичен составу композиций первого типа. Далее, после корпуса реактора, размещается водяной бак (15 см) и защита из свинца (30 см), а затем исследуемый материал (150 см).

Рассмотрение композиций двух типов позволяет оценить влияние спектров нейтронов и гамма-квантов, падающих со стороны активной зоны на защиту из исследуемого материала, на формирование в нем нейтронных и гамма-полей и распределений мощности дозы. В первом типе композиций наблюдается присутствие гамма-квантов из активной зоны, внутриреакторных конструкций и корпуса реактора. Во втором типе композиций благодаря свинцовой защите этот эффект отсутствует (или снижен до минимума), что позволяет выделить из всех потенциальных генераторов гамма-излучения (активной зоны и материалов конструкций), влияющих на величину потока гамма-квантов в исследуемом материале, только собственный источник захватного гамма-излучения.

Полученные данные для всех типов композиций представлялись в относительных единицах. При этом, хотя результаты приводятся в относительной форме, размерности величин плотности потоков нейтронов ( $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ) и мощности дозы гамма-квантов ( $\text{мкЗв/ч}$ ) находятся в абсолютном соотношении.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании полученных нейтронных и гамма-полей были рассчитаны величины длин релаксации для плотности потока быстрых нейтронов и мощности дозы гамма-квантов в исследуемых материалах для областей с установившимся равновесным спектром.

Результаты расчета показаны в табл. 1, 2.

Таблица 1  
Длины релаксации для плотности потока быстрых нейтронов ( $\lambda_{\text{бн}}$ , см) с энергией  $E > 2 \text{ МэВ}$  в исследуемых материалах в зависимости от толщины слоя материала ( $h$ , см)

Материал	$\lambda_{\text{бн}}(h)$ за слоем стали/свинца, см		
	$h=0 \dots 30$	$h=30 \dots 60$	$h=60 \dots 100$
ГТК	4,2/4,3	5,3/5,7	6,2/6,4
ГТК-ПЦ	4,6/4,7	5,8/6,2	6,8/7,0
ДГТ	6,7/6,7	7,9/8,4	9,2/9,7
КДГТ	5,0/5,1	6,0/6,4	7,0/7,2
КМДГТ	5,0/5,0	6,0/6,3	6,9/7,1

Здесь ГТК – компактный гидрид титана; ГТК-ПЦ – материал на основе крошки из компактного гидрида титана (ГТК) и порландцемента (ПЦ); ДГТ – дробь гидрида титана фракции 0,6...2,2 мм и насыпной плотностью 2,6  $\text{г/см}^3$ ; КДГТ – материал на основе дробы гидрида титана и порландцемента; КМДГТ – материал на основе модифицированной дробы гидрида титана и порландцемента.

Таблица 2

Длины релаксации для мощности дозы гамма-квантов ( $\lambda_r$ , см) в исследуемых материалах в зависимости от толщины слоя материала (h, см)

Материал	$\lambda_r(h)$ за слоем стали		$\lambda_r(h)$ за слоем свинца	
	h=30-60	h=60-100	h=30-60	h=60-100
ГТК	8,7	9,2	8,7	9,2
ГТК-ПЦ	9,6	10,2	9,6	10,2
ДГТ	13,5	14,8	13,5	14,9
КДГТ	9,9	10,6	9,9	10,7
КМДГТ	10,3	10,6	10,1	10,7

Длина релаксации быстрых нейтронов зависит от содержания в композиционном материале дроби гидроксида титана. Величины  $\lambda_{\text{бн}}$  для материалов КДГТ и КМДГТ (плотностью соответственно 3,325 и 3,320 г/см<sup>3</sup>) с максимальным содержанием дроби гидроксида титана (соответствующим уплотненному состоянию дроби) на 3...8% больше по сравнению с материалами ГТК и ГТК-ПЦ большей плотности (3,8 и 3,4 г/см<sup>3</sup>).

В исследуемых материалах водород присутствует в результате основы – гидроксида титана. Добавка водорода за счет затворенной воды, которая может остаться в смеси после сушки, по меньшей мере на порядок ниже, и играет второстепенную роль. Поэтому композиционные материалы ГТК-ПЦ после термообработки при 300 °С (в предположении, что вся затворенная вода уходит) по своим свойствам не уступают материалам КДГТ и КМДГТ, в которых некоторая часть затворенной воды остается.

Как можно заметить, с увеличением толщины расчетного слоя исследуемого материала возрастает величина  $\lambda_{\text{бн}}$ . Это происходит вследствие ужесточения нейтронного спектра по толщине. А несколько меньшие значения  $\lambda_{\text{бн}}$  для композиций со сталью можно объяснить тем, что после стали формируется более мягкий спектр для нейтронов в интервале энергий выше 2 МэВ по сравнению со спектром после свинца, поэтому групповое сечение выведения быстрых нейтронов будет больше, а длина релаксации – соответственно меньше (рис. 1, 2).

Что касается гамма-квантов, то величина  $\lambda_r$  в материалах в композициях со сталью и свинцом практически одинакова (рис. 3, 4). Это говорит о том, что характер распределения мощности дозы гамма-квантов ( $M_{D_r}$ ) по толщине и величину  $M_{D_r}$  за защитой определяют натекающие на переднюю стенку и захватные гамма-кванты в начальном слое материала толщиной несколько сантиметров. Причем в данном случае первая составляющая меньше второй, за исключением материала КМДГТ (за слоем стали).

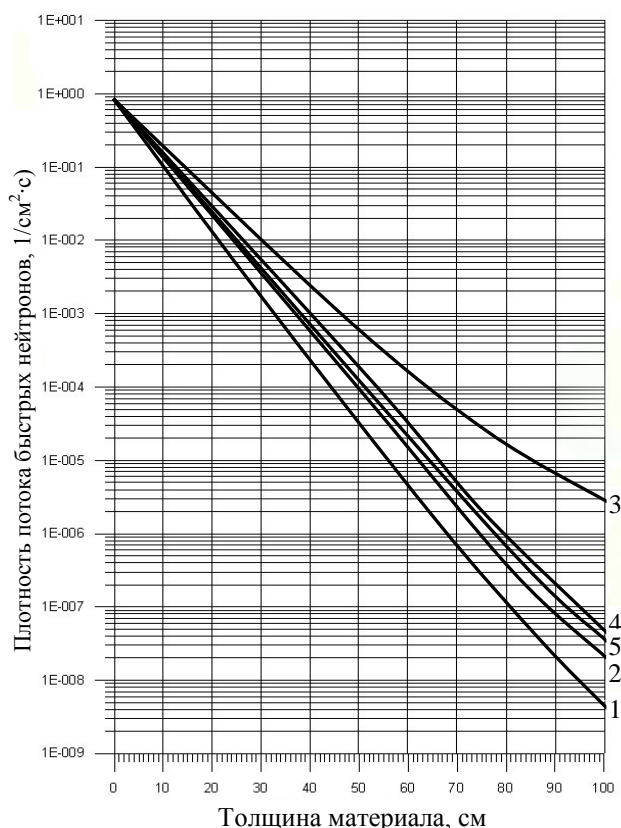


Рис. 1. Распределение плотности потока быстрых нейтронов в материалах за слоем стали: 1 – ГТК; 2 – ГТК-ПЦ; 3 – ДГТ; 4 – КДГТ; 5 – КМДГТ

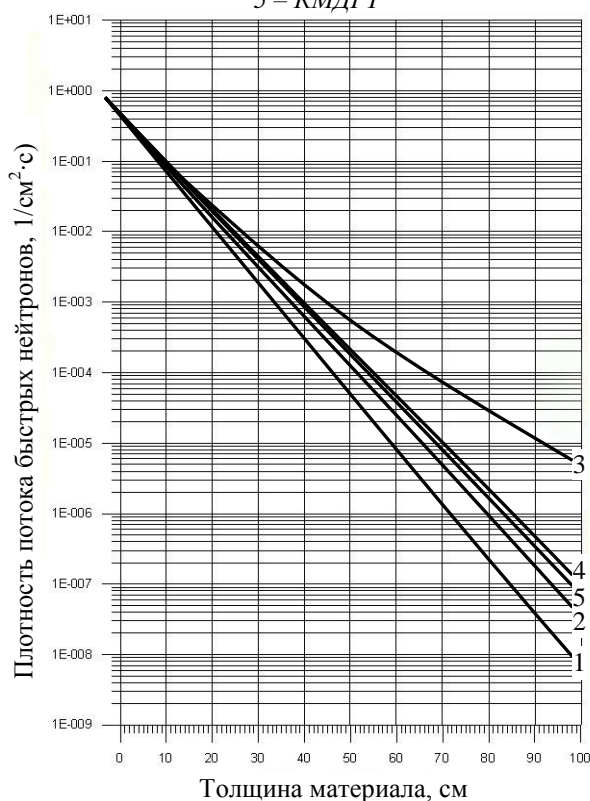


Рис. 2. Распределение плотности потока быстрых нейтронов в материалах за слоем свинца: 1 – ГТК; 2 – ГТК-ПЦ; 3 – ДГТ; 4 – КДГТ; 5 – КМДГТ

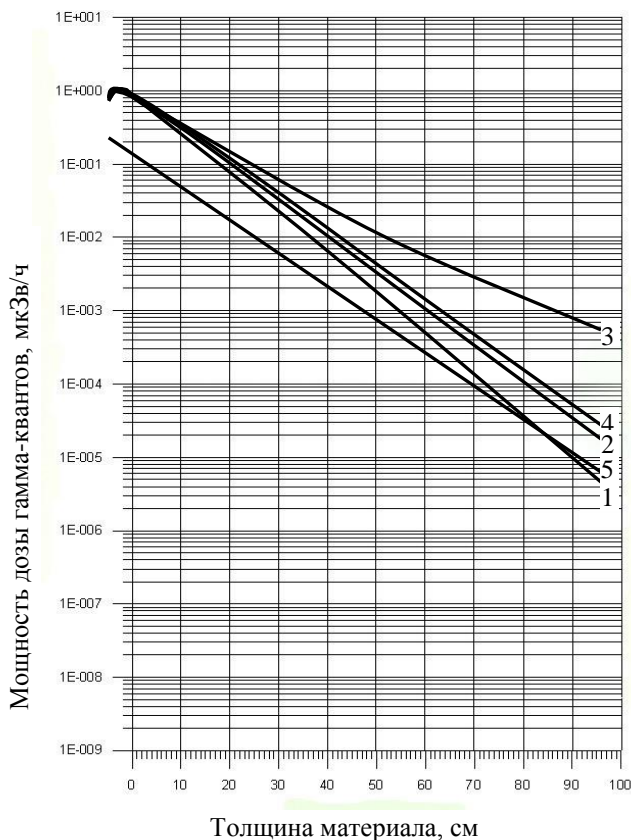


Рис. 3. Распределение мощности дозы гамма-квантов в материалах за слоем стали: 1 – ГТК; 2 – ГТК-ПЦ; 3 – ДГТ; 4 – КДГТ; 5 – КМДГТ

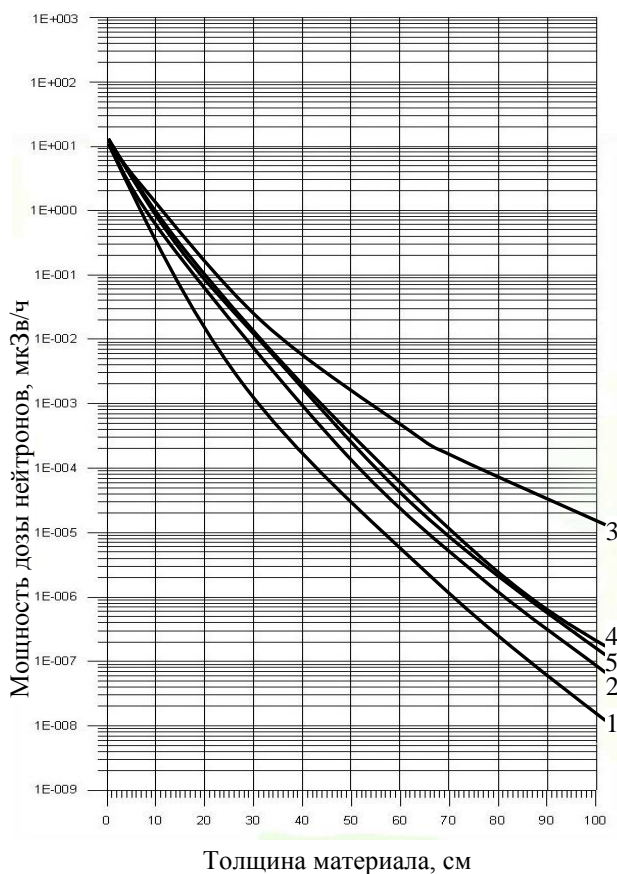


Рис. 4. Распределение мощности дозы нейтронов в материалах за слоем свинца: 1 – ГТК; 2 – ГТК-ПЦ; 3 – ДГТ; 4 – КДГТ; 5 – КМДГТ

Поэтому величина  $M_{\Gamma}$  за материалом определяется источником гамма-квантов, находящимся либо в начальном его слое, либо перед ним, и образование собственных захватных гамма-квантов в остальной части материала, а для материала КМДГТ (после стали) вообще во всем материале, роли не играет.

Длина релаксации мощности дозы гамма-квантов в водородосодержащих материалах также изменяется в зависимости от содержания в них дроби гидрида титана, но в установившейся области спектра уже не зависит от впереди стоящего материала. Величины  $\lambda_{\Gamma}$  для материалов КДГТ и КМДГТ больше по сравнению с материалами ГТК и ГТК-ПЦ на 5%.

Таким образом, кратности ослабления нейтронного и гамма-излучений зависят от их спектров на передней границе исследуемого материала. Эти спектры формируются материалами конструкций, находящимися перед исследуемыми материалами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований определяют перспективы использования конструкционных материалов на основе дроби гидрида титана для биологической защиты транспортных ЯЭУ. Использование модифицированной дроби гидрида титана улучшит защитные свойства композита (КМДГТ) в тепловой и надтепловой областях нейтронного спектра. Использование данных материалов позволит упростить технологию монтажа защиты ЯЭУ, улучшит ее качество и снизит стоимость.

Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания Минобрнауки РФ №1300.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ОСТ В95.548-2001. «Стандарт отрасли. Материалы биологической защиты транспортных ядерно-энергетических установок. Порядок проведения НИР и постановка материалов на производство». Введ. 13.03.2002. М.: Министерство РФ по атомной энергии, 2002, 10 с.
2. Патент РФ №2103286. Способ приготовления графитосодержащей композиции / Ермаков В.И., Крынский В.Н., Кревский В.В. Патентообладатель: Государственное предприятие Комбинат «Электрохимприбор». Оpubл. 27.01.1998.
3. Патент РФ №2160290. Способ приготовления графитосодержащей композиции / Ермаков В.И., Плешков И.М., Монастырев Ю.А. Патентообладатель: Государственное предприятие Комбинат «Электрохимприбор». Оpubл. 10.12.2000.
4. P.V. Matyukhin, V.I. Pavlenko, R.N. Yastrebinskii, N.I. Cherkashina. The high-energy radiation effect on the modified iron-containing composite material // *Middle-East Journal of Scientific Research*. 2013, v. 17(9), p. 1343-1349.
5. Н.И. Власенко, М.Н. Коротенко, С.Л. Литвиненко, В.В. Стовбун. Нейтронозащитные свойства гидридов титана и циркония с повышенным

содержанием водорода // *Ядерна та радіаційна безпека*. 2009, т.12, №4, с. 33-35.

6. В.И. Павленко, Г.Г. Бондаренко, О.В. Куприева, Р.Н. Ястребинский, Н.И. Черкашина. Модифицирование поверхности гидрида титана боросиликатом натрия // *Перспективные материалы*. 2014, №6, с. 19-24.

фицирование поверхности гидрида титана боросиликатом натрия // *Перспективные материалы*. 2014, №6, с. 19-24.

*Статья поступила в редакцию 22.07.2014 г.*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОСЛАБЛЕННЯ НЕЙТРОННОГО ТА ГАММА-ВИПРОМІНЮВАНЬ КОМПОЗИЦІЯМИ НА ОСНОВІ ГІДРИДУ ТИТАНУ**

*Р.М. Ястребинський, В.І. Павленко, Н.І. Черкашина, О.В. Купрієва*

Надана оцінка можливості застосування композиційних матеріалів на основі гідриду титану в біологічному захисту транспортних ядерних енергетичних установок. Проведено теоретичні розрахунки та експериментальні дослідження характеристик ослаблення нейтронного і гамма-випромінювання композиціями на основі гідриду титану. На підставі отриманих нейтронних та гамма-полів розраховані величини довжини релаксації для щільності потоку швидких нейтронів та потужності дози гамма-квантів у досліджуваних матеріалах для областей зі сталим рівноважним спектром. Встановлено, що кратності ослаблення нейтронного та гамма-випромінювань залежать від їх спектрів на передній межі досліджуваного матеріалу. Ці спектри формуються матеріалами конструкцій, що знаходяться перед досліджуваними матеріалами.

## **STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF NEUTRON AND GAMMA RADIATION ATTENUATION COMPOSITIONS BASED ON TITANIUM HYDRIDE**

*R.N. Yastrebinsky, V.I. Pavlenko, N.I. Cherkashina, O.V. Kuprieva*

Assess the potential of composite materials based on titanium hydride in biological protection of nuclear power plants. Theoretical calculation and experimental research of characteristics of neutron and gamma radiation attenuation compositions based on titanium hydride. On the basis of neutron and gamma values calculated length field relaxation to fast neutron flux density and dose rate of gamma-quanta in the studied materials for areas with established equilibrium range. The multiplicity of weakening of neutron and gamma radiation spectra are dependent on the anterior border of the investigated material. These spectra are formed by material structures in front of the studied materials.