

УДК 539.12.08+699.887.5(022)

А.Р. Бирман, Н.А. Белоногова

Бирман Алексей Романович родился в 1947 г., окончил в 1970 г. Ленинградский военно-механический институт, доктор технических наук, профессор кафедры технологий лесозаготовительных производств С.-Петербургской государственной лесотехнической академии. Имеет более 100 научных работ в области паркетного производства, склеивания и модифицированной древесины, создания древесных нейтронозащитных материалов.



НЕЙТРОНОЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ

Предложено для создания защиты от нейтронных потоков использовать борированную цельную или измельченную древесину, модифицированную уплотнением.

Ключевые слова: уплотненная древесина, ионизирующие излучения, нейтронозащитный материал.

Авария на Чернобыльской АЭС еще раз подняла вопрос о радиационной безопасности и необходимости расширения спектра научных исследований, направленных на создание защиты от ионизирующих излучений. Современные представления о создании новых защит обуславливают поиск новых нейтронозащитных материалов, их сочетаний с уже известными видами защиты, повышение эффективности такого поиска с использованием научных знаний во всех отраслях человеческой деятельности.

Практическая значимость сводится к использованию новых и, по возможности, более дешевых материалов для защиты. Например, доля затрат на обеспечение безопасности современных АЭС составляет почти 50 % от общих капитальных вложений. Стоимость защиты современных ядерно-технических установок может достигать 20 ... 30 % стоимости всего сооружения [2].

Нейтроны, не имеющие электрического заряда, не взаимодействуют с электрическим полем и проходят сквозь вещество (проникающее излучение), не испытывая столкновения с ядрами атомов, на сравнительно большое для элементарных частиц расстояние, измеряемое сантиметрами, что наиболее опасно с точки зрения биологического воздействия на живую ткань.

Наиболее эффективной защитой от нейтронов служат водородосодержащие материалы. Именно атомы водорода – лучшее препятствие глубокого проникновения нейтронов в вещество. На атомах водорода происходит максимальная потеря энергии нейтронов.

Примером этого утверждения о максимальной потере энергии нейтронов при столкновении с ядрами минимальной массы служат данные о числе столкновений нейтронов с ядрами атомов веществ разной плотности, необходимых для снижения энергии нейтронов, например, от 1 МэВ до 0,025 эВ (т. е. при переходе нейтронов из разряда быстрых в разряд тепловых). Исследования показали, что для достижения такого результата при

движении в уране требуется 2100 столкновений, в углероде – 100, в водороде – 25.

В атомной технике в качестве нейтронной защиты используют вещества с большим содержанием водорода (парафин, полиэтилен, гидриды металлов, вода) и, как правило, с примесью бора или боросодержащих материалов [1].

Древесина также является водородосодержащим материалом. Содержание водорода в единице ее объема не меньше, а часто и больше, чем в традиционно используемых защитных материалах. Анализируя литературные источники, можно сделать вывод о том, что древесину и древесные материалы не только не используют, но и не рассматривают, и не исследуют как нейтронозащитные.

До настоящего времени большинство исследований по взаимодействию древесины с ионизирующими излучениями имели задачу оценить изменение свойств древесины под воздействием радиации.

Пределы радиационной устойчивости древесины в деревообрабатывающей промышленности определены при использовании радиоактивных изотопов для гаммаскопии. Изучали действие радиации на связи компонентов лигноуглеводного комплекса. Рассматривали возможность получения продуктов радиолитического распада древесины как сырья для переработки химической промышленностью. Проводили исследования в области модификации древесины и изменения ее свойств в нужном направлении за счет действия ионизирующих излучений, т.е. определения влияния излучений (в основном, гамма-излучений) на свойства древесины и радиационно-химических превращений древесины и ее компонентов.

Цель настоящей работы – рассмотрение обратной задачи: не оценка изменений в древесине под действием ионизирующих излучений, а исследование изменений ионизирующих излучений, в частности, нейтронных потоков, при встрече с защитой как из натуральной (цельной или измельченной), так и модифицированной уплотнением и (или) пропиткой древесины.

Анализ результатов исследований, проведенных в СПбГЛТА, показал, что борированная древесина обеспечивает основную функцию защиты – эффективное замедление потоков низкоэнергетических, промежуточных и быстрых нейтронов с энергией $E \leq 5$ МэВ.

При этом физико-механические свойства древесины, высокая технологичность производства из древесных материалов защитных блоков практически любых форм и размеров, дешевизна по отношению к иным защитным материалам (за исключением борированной воды) ставят ее в привилегированное положение.

Для определения энергии, которую нейтрон теряет в результате упругого рассеяния в древесине, применимы классические законы сохранения энергии и импульса [3]. На рисунке изображена схема упругого взаимодействия нейтрона с атомом среды. Энергию, получаемую ядром атома-мишени в результате столкновения с нейтроном, можно выразить формулой

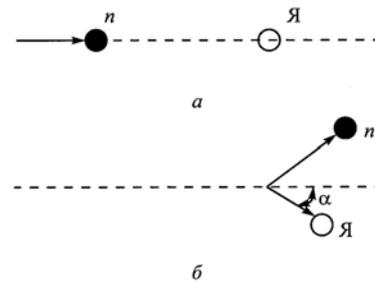
$$E_{\text{я}} = \frac{4M}{(M+1)^2} E_n \cos^2 \alpha, \quad (1)$$

где E_n – энергия нейтрона;

M – отношение массы ядра к массе нейтрона (равно массовому числу элемента A);

α – угол между направлением первоначального движения нейтрона и направлением вылета ядра отдачи.

Схема упругого рассеяния нейтрона на ядре атома до (*а*) и после (*б*) их столкновения



Из отношения (1) видно, что если произошло лобовое столкновение, т.е. $\alpha = 0$, то передаваемая энергия максимальна. При этом она передается ядру с минимальным значением $A = 1$:

$$E_{\text{я}}^{\text{макс}} = \frac{4 \cdot 1}{(1+1)^2} E_n = E_n.$$

При $\alpha > 0$ дальнейшее замедление и поглощение тепловых нейтронов происходит во внутренних слоях борированной водосодержащей среды.

Для подтверждения возможности использования древесины в качестве защиты от нейтронных потоков в СПбГЛТА были проведены экспериментальные исследования, методика которых была построена на сравнении защищающей способности деревянных образцов и образцов других защитных материалов, используемых в атомной промышленности.

Определяющим этапом экспериментальных исследований явились эксперименты по проверке защищающей способности уплотненной (с целью повысить концентрацию атомов водорода в единице объема) и пропитанной раствором борной кислоты древесины при воздействии нейтронных потоков различной плотности*.

При испытаниях применяли источник нейтронов (средняя энергия – 5,15 МэВ, выход нейтронов – $1,04 \cdot 10^6$ нейтр./с). Для получения потока тепловых нейтронов использовали этот же источник с шаровым замедлителем. Измерения проводили приборами ВРНГ и МКС-01Р с блоками детектирования БДКН-01Р и БДКН-03Р-01. Относительная погрешность измерения не превышала 25 %.

* Для экспериментов было использовано оборудование циклотронной лаборатории Физико-технического института (ФТИ) им. А.И. Иоффе и лаборатории № 031 Военной инженерно-космической академии (ВИКА) им. А.Ф. Можайского.

Образцы толщиной 100 мм были изготовлены из следующих материалов:

древесина березы со степенью уплотнения $\varepsilon = 0,5$ (в два раза) и влажностью $w = 10 \dots 12 \%$, пропитанная насыщенным раствором борной кислоты (при температуре $18 \dots 20 \text{ }^\circ\text{C}$);

полиэтилен низкого давления марки ПС-20-5Б;

материал с коммерческим названием «Neutrostop» на основе борированного полиэтилена, разработанный в Институте ядерных исследований в г. Ржежи (предоставлен ФТИ РАН, где используется в качестве биологической защиты в циклотронной лаборатории).

Следует отметить, что полиэтилен и «Neutrostop» – известные апробированные на объектах ядерной энергетики нейтронозащитные материалы.

Критерием оценки результатов экспериментов были относительные показатели в виде коэффициентов поглощения быстрых и тепловых нейтронов веществом защитных сред:

$$K_n^{б.н} = \frac{P_{ист}^{б.н}}{P_{ост}^{б.н}}; \quad K_n^{т.н} = \frac{P_{ист}^{т.н}}{P_{ост}^{т.н}},$$

где $P_{ист}^{б.н}$ и $P_{ист}^{т.н}$ – исходные плотности потоков соответственно быстрых и тепловых нейтронов источника;

$P_{ост}^{б.н}$ и $P_{ост}^{т.н}$ – остаточные плотности потоков соответственно быстрых и тепловых нейтронов, зарегистрированные детектором на экранах из защитных сред.

Усредненные результаты экспериментов сведены в таблице.

Анализ результатов исследований позволяет сделать следующие выводы:

значения коэффициентов $K_n^{б.н}$ для полиэтилена, материала «Neutrostop» и модифицированной древесины практически одинаковы;

коэффициент $K_n^{т.н}$ для модифицированной древесины в среднем в 2,63 раза больше, чем для полиэтилена.

В ходе проведения экспериментов выявлено, что модифицированная древесина по сравнению с полиэтиленом обладает лучшими не только защитными (в наибольшей степени – при защите от тепловых нейтронов), но и конструктивными характеристиками. По данным [4] предлагаемый для использования «Neutrostop» резко снижает прочность при температуре $70 \dots 80 \text{ }^\circ\text{C}$ и течет при $115 \text{ }^\circ\text{C}$, выделяя токсичные газы.

Другие известные водородосодержащие защиты имеют ряд существенных недостатков. Так, к неудовлетворительным свойствам воды, как защиты, следует отнести необходимость ее размещения в баках из нержавеющей стали или алюминия, что усложняет и удорожает ее применение. Гидриды металлов в качестве защиты при повышении температуры $80 \text{ }^\circ\text{C}$ разлагаются с выделением водорода; их заключают в емкости, способные выдержать высокое давление, что удорожает стоимость защиты. Парафин не

обладает несущей способностью и не может, в отличие от древесины, быть использован в качестве конструкционного материала.

Очевидно, что изготовление нейтронозащитных блоков сложного профиля из цельной древесины – технологически (а также в стоимостном отношении) значительно более сложная задача, чем формирование таких

Образец	Значение коэффициентов поглощения при исходной плотности потока нейтронов, нейтр. / (с ² · с)				
	380	135	71	32	22
Древесина березы	3,4/10,4	3,4/9,3	3,5/9,9	3,3/9,6	2,0/–
Полиэтилен	3,5/3,7	3,4/3,8	3,5/3,8	3,4/3,6	–
Neutrostop	–	–	–	–	2,0/–

Примечание. В числителе приведены данные для потоков быстрых нейтронов источника, в знаменателе – для тепловых.

блоков из измельченной древесины. С учетом этого на базе ВИКА им. А.Ф. Можайского были проведены эксперименты по исследованию нейтронозащитных свойств измельченной древесины.

Соединение древесных частиц в блоки осуществляли при термопезообработке за счет реакционноспособных компонентов, содержащихся в древесном веществе (т. е. без внесения в древесную массу искусственных клеящих веществ). Объектом исследований являлись опилки древесины осины, полученные при продольном пилении круглыми пилами. Начальная плотность материала составляла 0,52, конечная – 1,20 г/см³. В качестве боросодержащих соединений использовали борную кислоту (H₃BO₃) и буру (тетраборат натрия Na₂B₄O₇ · 10H₂O), которые подавали через форсунки в смеситель барабанного типа.

Для создания нейтронного потока использовали Ra(Be)-источник (энергия – 4,5 МэВ, выход – 3,1 · 10⁴ нейтр./с), для регистрации – счетчик СММ-10, окруженный замедлителем нейтронов из оргстекла.

Анализ экспериментальных данных показал, что защищающая способность блоков из древесных частиц при взаимодействии потоков быстрых нейтронов соответственно на 6 и 12 % ниже защищающей способности полиэтилена и парафина.

Имеются способы более глубокого уплотнения древесной массы и дополнительного повышения ее нейтронозащитных свойств. Применение блоков из уплотненных древесных частиц (или уплотненной цельной древесины) рационально в тех случаях, когда предъявляются требования к уменьшению габаритных размеров защиты. Если же пространство для размещения защиты не ограничено, то можно использовать древесные частицы (опилки, щепа и т.д.) в качестве насыпной наружной защиты или засыпного материала в межстенных ограждениях.

Возможные примеры использования защиты на основе натуральной и измельченной древесины с включением боросодержащих веществ: местная защита, обеспечивающая доступ в облучаемые помещения (ремонт, пе-

риодический контроль оборудования и др.); элементы вторичной защиты для предотвращения прострела излучения через ослабленные места первичной защиты (например, выход трубопроводов); коллиматоры излучения; поглотители; устройства экранирования фона излучения; транспортировочные контейнеры; биологическая защита при работе с изотопами; защита при проведении научных экспериментов; применение в ядерной спектроскопии; защита счетчиков низкой активности.

Способы обработки древесины и древесных материалов в целях изготовления нейтронозащитных материалов защищены авторским свидетельством на изобретение и патентом.

Выводы

1. Цельную и измельченную борированную древесину можно использовать для защиты от нейтронных потоков малых и средних энергий.

2. При воздействии быстрых нейтронов этот материал обладает защищающей способностью, сравнимой с апробированными водородосодержащими защитами (борированная вода, парафин, полиэтилен, материал «Neutrostop»).

3. При воздействии тепловых нейтронов (ответственных за поражение живых тканей) этот материал показал защитные свойства, в 2,5 – 3,0 раза превышающие апробированные защиты.

4. Древесная защита может служить конструкционным, тепло- и звукоизоляционным, декоративно-облицовочным материалом, который при обработке антисептиками и антипиренами долговечен и малогорюч.

5. При отсутствии требований к уменьшению габаритов защиты целесообразно применение цельной или измельченной борированной древесины без ее модификации уплотнением.

6. Нейтронозащитные древесные материалы в 20–30 раз дешевле применяемых в настоящее время водородосодержащих защитных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоногова, Н.А. Повышение защитных свойств низкосортной древесины путем пропитки и уплотнения: автореф. ... канд. техн. наук [Текст] / Белоногова Н.А. – Изд-во ЛТА, 1999. – 20 с.

2. Голубев, Б.П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений [Текст] / Б.П. Голубев. – М.: Атомиздат, 1976. – 504 с.

3. Исаев, Б.М. Нейтроны в радиобиологическом эксперименте [Текст] / Б.М. Исаев, Ю.И. Брегадзе. – М.: Наука, 1967. – 292 с.

4. Neutrostop. Export – Import KOVO. – Praha, 1985. – 5 с.

С.-Петербургская государственная
лесотехническая академия

Поступила 14.11.05

A.R. Birman, N.A. Belonogova

Neutron-shielding Wood Characteristics

It is proposed to use borated solid or milled wood modified by compacting for establishing shield against neutron flows.

