

Б. Н. Карев, И. В. Яцун, Ю. И. Ветошкин,
Ан. В. Мяслицин

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ РЕНТГЕНОЗАЩИТНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Ключевые слова: композиционный материал, рентгенозащитный материал, ослабление потока рентгеновских лучей, интенсивность потока излучения, толщина рентгенозащитного материала.

Теоретическим путем получены зависимости, позволяющие определить минимальную и максимальную толщины композиционного рентгенозащитного материала ПЛИТОТРЕН. Расчеты проводились по рентгеновской плотности и коэффициенту ослабления единицей массы веществ, входящих в состав материала.

Keywords: composite material, x-ray protective material, weakening of the flux of X-rays, intensity of the radiation flux, thickness of the material x-ray.

Theoretically obtained dependences allowing to determine the minimum and maximum thickness of the composite-material PLITOTREN onnogo x-ray. The calculations were carried out by X-ray density and attenuation coefficient of a unit mass of matter that make up the material.

Настоящее время называют веком «композиционных материалов». Действительно, сейчас доля композиционных материалов среди потребительских материалов как никогда велика и с каждым годом растет [1]. Бурное развитие современной техники требует все новые материалы с заранее задаваемыми свойствами, отличающимися различными характеристиками (повышенной прочностью, твердостью, жаропрочностью и т.д.). Главное преимущество композиционных материалов по сравнению с традиционными материалами – уникальное сочетание свойств. Как правило, композиционные материалы не являются «чемпионами» по отдельно взятому свойству, но по сочетанию определенных свойств им нет равных.

Все композиционные материалы можно разделить на два вида: естественные и искусственные. Одним из самых распространенных на Земле естественных композиционных материалов является древесина. Это легкий и в то же время прочный материал, хорошо поддающийся механической обработке, облагораживанию и склеиванию, отличается гигиеничностью и неповторимой красотой.

Композиты на основе древесины – это материалы, состоящие из древесины и ее частиц и одного или нескольких компонентов (полимера, минерала и др.).

Создание композиционных материалов на основе древесины и древесных частиц с включением в их конструкцию различных компонентов позволяет получать новые материалы с заранее задаваемыми специфическими свойствами.

Одним из таких направлений является разработка достаточно эффективных рентгенозащитных композиционных материалов, в состав которых не входит токсичный свинец, требующий особой утилизации после эксплуатации.

В результате поисковых исследований в области радиационной защиты кафедрой механической обработки древесины Уральского государственного лесотехнического разработан рентгенозащитный композиционный материал ПЛИТОТРЕН. Он изготовлен на основе древесных частиц, связующего и минерального наполнителя.

Количественная сторона возникающих при этом процессов определяется энергией и спектральным составом падающего пучка рентгеновских лучей, плотностью и химическим составом облучаемой среды [2, 3, 4].

При прохождении слоя однородной среды толщиной dx интенсивность рентгеновского излучения I уменьшается на величину dI , т.е.:

$$dI = -\mu I dx, \quad (1)$$

где μ – линейный коэффициент ослабления, $см^{-1}$.

Интегрируя соотношение (1) и полагая, что при $x = 0$ интенсивность $I = I_0$, имеем:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}, \quad (2)$$

где I_0 и I – соответственно значение интенсивности пучка, падающего на вещество и дошедшего до глубины x , кэВ.

Определим рентгенозащитные свойства композиционного материала ПЛИТОТРЕН при определенных пропорциях составляющих компонентов, входящих его состав (табл. 1).

В дальнейшем нам потребуется знать величину рентгеновской плотности древесины $\rho_r^{(д)}$. Метод определения величины $\rho_r^{(д)}$ рассматривался в [5, 6], но применение данного метода определения рентгеновской плотности древесины затруднительно, так как древесина имеет сложное химическое строение. К сожалению, и в литературе данные о величине рентгеновской плотности древесины отсутствуют. Однако величина $\rho_r^{(д)}$ может быть определена экспериментальным путем.

Пусть на пластинку ПЛИТОТРЕНА (связующее и древесные частицы), имеющую поперечное сечение $1 см^2$ и толщину T , падает пучок рентгеновских лу-

чей интенсивности I_0 имеющую поперечное сечение 1 см^2 . Связующее вещество, используемое при изготовлении ПЛИТОТРЕНА, практически не изменяет интенсивность проходящих через нее рентгеновских лучей. Поэтому будем считать, что после прохождения через пластинку ПЛИТОТРЕНА рентгеновских лучей интенсивность излучения уменьшается массой древесины.

Таблица 1 - Содержание компонентов ПЛИТОТРЕНА

№ п/п	Составляющая	Процент от объема
1	Связующее	10
2	Древесные частицы	30 – 50
3	Минеральный наполнитель	40 – 60

Коэффициент ослабления единицей массы древесины обозначим – $\mu_m^{(д)}$ (размерность $[\text{см}^2/\text{г}]$). После прохождения через пластинку ПЛИТОТРЕНА интенсивность пучка рентгеновских лучей составит величину I_T . Из таблицы 1 видно, что объем древесины в пластине ПЛИТОТРЕНА численно равен 0,9Т. Тогда на основании закона ослабления рентгеновских лучей можем записать:

$$I_T = I_0 e^{(-0,9\mu_m^{(д)}\rho_r^{(д)}T)}.$$

Логарифмируя последнее равенство по натуральному основанию, получим

$$\ln I_T = \ln I_0 - 0,9\mu_m^{(д)}\rho_r^{(д)}T.$$

Откуда получаем

$$\rho_r^{(д)} = \frac{1}{0,9\mu_m^{(д)}T} \ln \frac{I_0}{I_T}.$$

Таким образом, величина рентгеновской плотности древесины [7] (размерность $[\text{г}/\text{см}^3]$) может быть определена экспериментально.

Рассмотрим некоторый объем состоящий из различных веществ. Так как фотоэлектрическое поглощение рентгеновских лучей в веществе – процесс атомный, и расчет величины ослабления интенсивности можно проводить, учитывая не толщину слоя, а количество вещества (его массу), находящегося в рассматриваемом объеме, то величина ослабления рентгеновских лучей одним из веществ, содержащимся в рассматриваемом объеме, не зависит от расположения частиц этого вещества. Опираясь на этот факт, можем рассматривать пластинку ПЛИТОТРЕНА сечением 1 см^2 и толщиной Т как пластинку, состоящую из трех слоев I – связующее, II – древесинные частицы, III – минеральный наполнитель (рис. 1). Пусть на пластинку ПЛИТОТРЕНА, состоящую из трех слоев, имеющую поперечное сечение 1 см^2 и толщину Т, падает пучок рентгеновских лучей ин-

тенсивности I_0 . Известно, что связующее, оказывает незначительное влияние на снижение интенсивности излучения [8], поэтому будем считать, что интенсивность рентгеновских лучей после прохождения слоя связующего толщиной T_c не меняется и составляет I_0 . Коэффициент ослабления единицей массы древесины обозначим – $\mu_m^{(д)}$, а рентгеновскую плотность древесины – $\rho_r^{(д)}$.



Рис. 1 - Распределение компонентов в композиционном материале ПЛИТОТРЕН

После прохождения через первый слой пластинки интенсивность рентгеновских лучей (в силу сделанного предположения) не меняется и составит I_0 . Следовательно, на поверхность второго слоя пластинки падает пучок рентгеновских лучей интенсивности I_0 .

Так как толщина второго слоя древесины T_d может меняться в промежутке $0,3T \leq T_d \leq 0,5T$, то введем в рассмотрение переменную величину толщины слоя древесины, которую определим следующим равенством:

$$T_d(\alpha) = 0,3T(1 - \alpha) + 0,5T\alpha$$

или

$$T_d(\alpha) = 0,2T\alpha + 0,3T, \quad (3)$$

где параметр $\alpha \in [0,1]$.

Функция $T_d(\alpha)$ на отрезке $[0,1]$ возрастающая и удовлетворяет неравенствам $0,3T \leq T_d(\alpha) \leq 0,5T$. Тогда на основании закона ослабления рентгеновских лучей [9, 10] можем записать:

$$I_{T_d(\alpha)} = I_0 e^{[-\mu_m^{(д)}\rho_r^{(д)}T(\alpha)]}. \quad (4)$$

Последнее равенство означает, что на поверхность третьего слоя падает пучок рентгеновских лучей интенсивности $I_{T_d(\alpha)}$.

Запишем выражение толщины $T_h(\alpha)$ третьего слоя минерального наполнителя, зная толщину слоя древесины и слоя связующего:

$$T_h(\alpha) = 0,6T - 0,2T\alpha, \quad (5)$$

где параметр $\alpha \in [0,1]$.

Очевидно, что при $\alpha \in [0,1]$ убывающая функция $T_H(\alpha)$ удовлетворяет неравенствам $0,4T \leq T_H(\alpha) \leq 0,6T$.

Коэффициент ослабления единицей массы минерального наполнителя обозначим $\mu_m^{(H)}$, а его рентгеновскую плотность $\rho_r^{(H)}$. Тогда на основании закона ослабления рентгеновских лучей можем записать:

$$I_T = I_{T(\alpha)} e^{-\mu_m^{(H)} \rho_r^{(H)} T_{H(\alpha)}}$$

или с учетом равенств (3 - 5):

$$I_T = I_0 e^{T[0,2[\mu_m^{(H)} \rho_r^{(H)} - \mu_m^{(D)} \rho_r^{(D)}]\alpha - 0,3[2\mu_m^{(H)} \rho_r^{(H)} + \mu_m^{(D)} \rho_r^{(D)}]]}. \quad (6)$$

Прологарифмировав равенство (6) по основанию e , получим, что суммарная толщина слоя древесины и слоя минерального наполнителя составит:

$$T = - \frac{\ln \frac{I_0}{I_T}}{0,18[\mu_m^{(H)} \rho_r^{(H)} - \mu_m^{(D)} \rho_r^{(D)}]\alpha - 0,27[2\mu_m^{(H)} \rho_r^{(H)} + \mu_m^{(D)} \rho_r^{(D)}]} \quad (7)$$

Равенство (7) показывает, что толщина пластинки является функцией параметра $\alpha \in [0,1]$.

Убедимся, что толщина пластинки, определенная равенством (7) положительна.

Числитель выражения (6) положителен, так как основание логарифма $e > 1$ и $I_0/I_T > 1$. Убедимся, что знаменатель в выражении (6) отрицателен. Рассмотрим функцию $F(\alpha)$, которая представляет собой знаменатель выражения (7).

При $\alpha = 0$

$$F(0) = -0,27[2\mu_m^{(H)} \rho_r^{(H)} + \mu_m^{(D)} \rho_r^{(D)}] < 0. \quad (8)$$

При $\alpha = 1$

$$F(1) = -0,36\mu_m^{(H)} \rho_r^{(H)} - 0,45\mu_m^{(D)} \rho_r^{(D)} < 0. \quad (9)$$

Так как функция $F(\alpha)$ строго монотонно возрастает, и выполняются неравенства (8) и (9), то для $\alpha \in [0,1]$ $F(\alpha) < 0$. Следовательно, толщина пластинки, определенная равенством (7) положительна.

Формула (7) позволяет определять толщину $T(\alpha)$ пластины ПЛИТОТРЕНА, если известна величина, на которую необходимо понизить величину интенсивности излучения рентгеновских лучей.

Толщина пластинки, как было показано, является функцией параметра $\alpha \in [0,1]$, следовательно, можем обозначить $T = T(\alpha)$.

Так как производная функции $T(\alpha)$ положительна на отрезке $[0,1]$, то функция $T(\alpha)$ строго монотонно возрастает на этом отрезке. При $\alpha = 0$ она достигает наименьшего значения, которое равно

$$\min_{\alpha \in [0,1]} T(\alpha) = \frac{\ln \frac{I_0}{I_T}}{0,27[2\mu_m^{(H)} \rho_r^{(H)} + \mu_m^{(D)} \rho_r^{(D)}]}, \quad (11)$$

а при $\alpha = 1$ она достигает наибольшего значения

$$\max_{\alpha \in [0,1]} T(\alpha) = \frac{\ln \frac{I_0}{I_T}}{0,36\mu_m^{(H)} \rho_r^{(H)} + 0,45\mu_m^{(D)} \rho_r^{(D)}}. \quad (12)$$

Формулы (11-12) позволяют определять максимальную и минимальную толщину пластины соответственно в зависимости от начальных условий I_0, I_T , и, кроме того, определять толщину разработанного материала, удовлетворяющую начальным условиям, для любого $\alpha \in [0,1]$, при этом сохраняются оптимальные пропорции составляющих, входящих в состав материала.

Графически полученные выражения представлены на рис. 2 – 3.

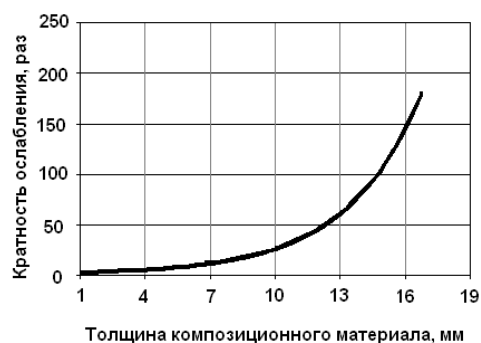


Рис. 2 - Зависимость кратности ослабления от толщины композиционного материала ПЛИТОТРЕН



Рис. 3 - Зависимость интенсивности излучения от толщины композиционного материала ПЛИТОТРЕН

Выводы

1. Фотоэлектрическое поглощение рентгеновских лучей в веществе – процесс атомный, поэтому при расчете величины ослабления интенсивности учитывается лишь количество вещества (его мас-

- са), находящаяся в облучаемом объеме независимо от расположения частиц этого вещества.
2. Теоретически полученные математические модели позволяют определить минимальную и максимальную толщину разработанного композиционного материала ПЛИТОТРЕН.

Литература

1. Медведева Г.А., Герасимов В.В., Ахметова Р.Т., Ефимова В.А. Полисульфидные композиционные материалы строительного назначения: технология и свойства // Вестник Казанского технологического университета, 2011. №17. С.75-80.
2. Голубев Б.А. Дозиметрия и защита от ионизирующего излучения. – Л.: Государственное энергетическое изд-во, 1963. – 336 с.
3. Аглинцев К.К. Дозиметрия ионизирующих излучений. – М.: Техникo – техническая литература, 1957. – 503 с.
4. Сивухин Д.В. Атомная и ядерная физика. – М.: Наука, 1989. – 416 с.
5. Ванин С.И. Дровесиноведение. – Л.: Гослестехиздат, 1949. – 439 с.
6. Никитин Н.И. Химия дровесины и целлюлозы. – М.-Л.: Академия наук СССР, 1962. – 711 с.
7. Лейпунский О.И., Новожилов Б.В., Сахаров В.Н. Распределение гамма-квантов в веществе. – М., 1960.
8. Машкович В.П., Панченко А.М. Основы радиационной безопасности. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 496 с.
9. Блохин М.А. Физика рентгеновских лучей. – М.: ГТТИ, 1957. – 518 с.
10. Рентгеновские лучи. Под ред. М.И. Блохина. – М.:ИИЛ, 1960. – 468 с.

© **Б. Н. Карев** - ст. препод. каф. автомобильного транспорта, Уральский государственный лесотехнический университет; **И. В. Яцун** - к.т.н., доц. каф. механической обработки дровесины, Уральский государственный лесотехнический университет, iryatsun@mail.ru; **Ю. И. Ветошкин** - к.т.н., проф. той же кафедры; **Ан. В. Мялицин** – асп. той же кафедры.