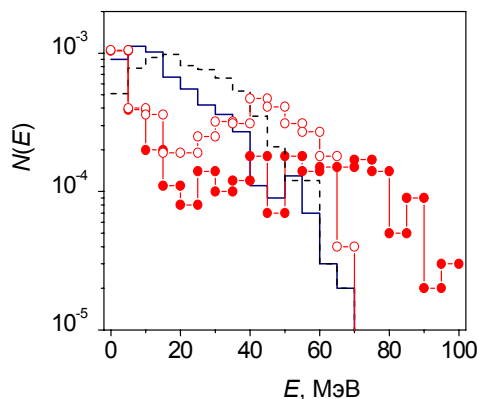


Р и с. 4. Энергетические спектры обратного рассеяния осколков деления, вылетающих из делящихся слоев на алюминиевой подложке: ●, ○ — ^{97}Mo для толщины слоя 50 и 400 мкг/см² соответственно; —, — — — ^{139}Ba для толщины слоя 50 и 400 мкг/см²



В заключение отметим, что реализованный в работе подход свидетельствует о преобладающем влиянии многократного рассеяния осколков деления на их торможение в тонких пленках, где механизм непрерывного замедления еще не развит. Его последовательный учет позволил оценить вероятность вылета из слоя осколков деления и их энергетический спектр.

Автор выражает свою признательность В.А. Хрячкову за полезные советы и обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бете Г., Ашкин Ю. Прохождение излучения через вещество. — В кн.: Экспериментальная ядерная физика. Пер. с англ. Под ред. Э. Сегре. М.: Изд-во иностр. лит., 1955, т. 1, ч. 2, с. 141—297.
2. Росси Б., Штауб Г. Ионизационные камеры и счетчики. Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1951.
3. Штауб Г. Методы регистрации. — В кн.: Экспериментальная ядерная физика. Пер. с англ. Под ред. Э. Сегре. М.: Изд-во иностр. лит., 1955, т. 1, ч. 1, с. 103.
4. Калашников Н.П., Ремизович В.С., Рязанов М.И. Столкновения быстрых заряженных частиц в твердых телах. М.: Энергоатомиздат, 1980.
5. Ziegler J., Biersack J., Littmark U. The Stopping and Ranges of Ions in Solids. New York: Pergamon Press, 1985.
6. Дворяшин А.М., Косарев С.А., Туманов А.А. и др. Распределение длины треков осколков деления ^{235}U в лавсановых пленках. — Атомная энергия, 2004, т. 96, вып. 4, с. 305—310.
7. Гангрский Ю.П., Марков Б.Н., Перельгин В.П. Регистрация и спектрометрия осколков деления. М.: Энергоатомиздат, 1981, с. 203.
8. Горбачев В.М., Замятин Ю.С., Лбов А.А. Взаимодействие излучений с ядрами тяжелых элементов и деление ядер. М.: Атомиздат, 1976.

Поступила в Редакцию 23.09.05

УДК 615.478.73

РАДИАЦИОННАЯ СТЕРИЛИЗАЦИЯ ПОЧТОВЫХ ОТПРАВЛЕНИЙ

Зиновьев О.А., Скобкин В.С., Лобанов Н.С., Чугунов О.К., Пижов Г.Я.
(РНЦ «Курчатовский ин-т»), Найденов А.Я., Дубинина Т.П. (Биохиммаш)

В настоящее время возникла необходимость в развитии радиационной стерилизации почтовых отправок. Существует мнение, что для радиационной стерилизации почтовых отправок, поступающих из карантинной зоны, достаточно знать лишь экспозиционную дозу ионизирующего излучения. Как показали первые опыты, для установления промышленных регламентов процесса этого недостаточно.

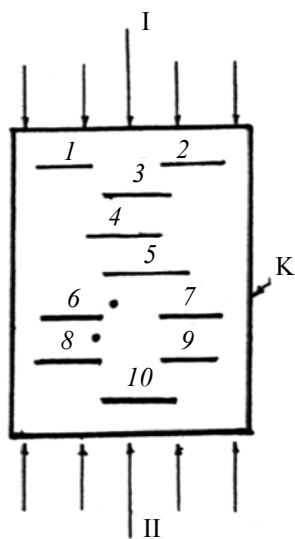
Кроме того, возможное применение патогенных микроорганизмов в качестве биологического оружия [1—3] предопределило экспериментальное апробирование технологии промышленной стерилизации почтовых отправок радиационными методами.

В настоящей статье представлены результаты стерилизации почтовых отправок в типовых образцах упаковочной тары с помощью пучково-плазменного разряда на ускорителе электронов и в поле γ -излучения фотонов энергией 1,33 МэВ ^{60}Co .

При стерилизации почтовых отправок необходимо обеспечить условия асептики, которые заключаются в разделении технологических зон на две — «грязную» зону поступления почтовых отправок на стерилизацию и чистую зону выхода и хранения объектов, прошедших стерилизацию. Между собой эти зоны должны быть разделены сплошной перегородкой с независимым выходом, который находится под тщательным контролем, исключающим смешение простерилизованных и грязных почтовых отправок [4]. Объект (книги) поступает в стандартной таре, картонной или пластиковой коробке размером 600×300×300 мм, запечатанной герметично в полиэтиленовый пакет. Толщина пленки >150 мкм. Объекты, подлежащие стерилизации, размещают в реакционной зоне по специально разработанной схеме с учетом высоты установки стерилизуемого объекта и распределения интенсивности γ -излучения по зоне. Для набора необходимой поглощенной дозы объекты облучают несколько суток. Для равномерного облучения их необходимо последовательно поворачивать на 180°, в результате чего при повторном облучении поглощенная доза дополняется и выравнивается. Простерилизованные объекты перемещают в чистое помещение, где их осматривают, проводят дополнительный контроль и составляют протокол установленной формы.

Для отработки необходимого режима радиационной стерилизации разработаны микробиологические тест-системы, представляющие собой полиэтиленовые пакеты, в которые были заложены образцы сублимационно высушенной тест-культуры *Bac Thuringiensis* — имитатора возбудителя сибирской язвы *Bac Anthracis*. Число спор в каждом образце составляло $2 \cdot 10^8$. В качестве образцов почтовых отправок использовали макеты, состоящие из 16 книг по 304 листа и плотно уложенные в картонную тару.

Стерилизация на гамма-установке. Пакетики с тест-культурой в количестве 1 г в каждом размещали в макете между книгами на различном расстоянии от источника. В таком же порядке размещали пленочные дозиметры. Размещение биообразцов и дозиметров в макете представлено на рис. 1. Объекты облучали при мощности экспозиционной дозы γ -излучения $E \ 6 \text{ Р/с}$ до набора поглощенной дозы $E \ 10 \text{ Мрад}$. Выбор указанной мощности экспозиционной дозы обусловлен тем, что со-



Р и с. 1. Схема размещения микробиологических тест-систем (1—10) внутри макета почтовых отправок: → — направление потока мощности γ -излучения (I) и после поворота (II); К — корпус ящика

временные промышленные гамма-установки с ^{60}Co имеют в основном аналогично этой остаточную мощность излучения (см. таблицу).

Результаты облучения тест-образцов при $E = 1,33 \text{ МэВ}$, $P = 6 \text{ Р/с}$

Режим γ -облучения				Число образцов	Примечание
$D_{\text{эсп}}$, МР*	$K_{\gamma} = D_{\text{полг}}/D_{\text{эсп}}$	Время облучения, сут	Выживаемость		
0,3	1	0,57	$2 \cdot 10^8$	5	Без бумаги
0,6	1	1,15	$2 \cdot 10^6$	5	— » —
0,9	1	1,73	$6 \cdot 10^5$	5	— » —
1,2	1	2,31	$5 \cdot 10^4$	5	— » —
1,5	1	2,8	40	5	— » —
2,1	0,0016	4	Стерильно	3	Бумага 150 л.
5	0,0578	4,5	— » —	3	300 л.
6	0,0578	4,5	— » —	3	1500 л.
7	0,0578	4,5	— » —	3	2100 л.
10	0,0578	4,5	— » —	3	4100 л.
Контроль		0	$2 \cdot 10^9$	2	

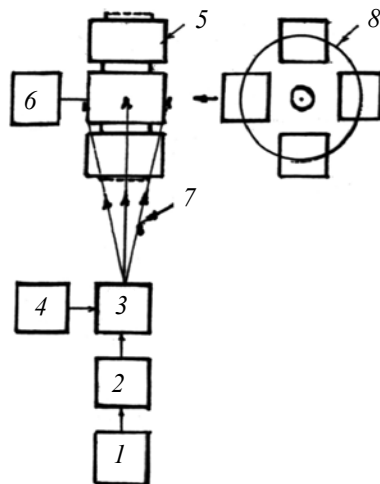
* $D_{\text{эсп}}$ — экспозиционная доза излучения, регистрируемая контрольными дозиметрами [5], $D_{\text{полг}}$ — поглощенная биологическими материалами и бумагой почтовых отправок доза, определяемая с помощью коэффициента $K_{\gamma} = D_{\text{полг}}/D_{\text{эсп}}$ для реальных условий.

Из экспериментальных данных видно, что уже при экспозиционной дозе 2,1 МР в течение 4 сут облучения на установке ГУТ 200 М наблюдается полное подавление роста споровой культуры *Bac Thuringiensis*. Поскольку установка эксплуатируется в течение 18 лет, для сокращения времени стерилизации почтовых отправок необходимы периодический контроль и замена радиоактивных источников ^{60}Co .

Стерилизация с помощью ускорителя электронов «Факел». Почтовые отправления с помощью электронного пучка высокой энергии стерилизуются за счет пучково-плазменного разряда в атмосфере и твердом теле [6]. Электроны энергией 9 МэВ способны проникать в твердое тело плотностью менее $< 1 \text{ г/см}^3$ на глубину до 0,5 м, возбуждая на своем пути пучково-плазменный разряд. Стерилизация почтовых отправок с помощью ускорителя «Факел» отличается от стерилизации на гамма-установке лишь тем, что не требуется поворачивания.

Для стерилизации на линейном ускорителе «Факел» использовали две СВЧ-секции и инжектор электронов. Пучок электронов модулировали по азимуту так, чтобы охватить зону стерилизуемого объекта по длине (600 мм). При этом сам объект, находившийся в ячейке карусельного конвейера (мельничного колеса), перемещали по высоте. Блок-схема стерилизационной установки вместе с биологическими тест-системами и мельничным колесом показана на рис. 2.

Рабочий режим стерилизации ускорителя электронов следующий: энергия электронов 9 МэВ, длительность импульсов 1 мкс с частотой 400 Гц при токе в импульсе $\sim 1 \text{ А}$, эффективный диаметр пучка электронов на мишени $\sim 25 \text{ мм}$, путь пучка от источника $\sim 1,5 \text{ м}$. Мгновенная мощность экспозиционной дозы в зоне вы-



Р и с. 2. Блок-схема стерилизационной установки на основе ускорителя электронов «Факел»: 1 — источник питания электронов; 2 — инжектор электронов; 3 — модулятор азимутального движения электронного пучка; 4 — источник питания двигателя мельничного колеса и модулятора электронного пучка; 5 — мельничное колесо с объектами стерилизации (вид сбоку); 6 — двигатель мельничного колеса; 7 — электронный пучок; 8 — вид мельничного колеса (в плане)

пусковой фольги составляла 4,25 МР/с, после преодоления воздушного пути она составила 1 МР/с. Поглощенную дозу электронного облучения измеряли цветными полиэтиленовыми дозиметрами с погрешностью $\leq 25\%$.

Если учесть радиационный режим электронного пучка на мишени, то можно рассчитать среднюю мощность поглощенной дозы в рабочей зоне, т.е. в коробке с почтовыми отправлениями. Она составляет $\sim 5,55$ крад/с. Полученный результат позволяет рассчитать временные характеристики пучково-плазменного разряда с учетом коэффициента передачи энергии пучка к мишени: $K = P_{\text{макс}}/P = 0,1$. Принимая во внимание, что полное подавление роста спор отмечается при поглощенной дозе $D_{\text{полг}} \sim 10$ Мрад, ориентировочно необходимая продолжительность облучения составляет $T = D_{\text{полг}}/P_{\text{макс}} = 10^4 \text{ крад} / 5,55 \text{ крад/с} = 1800 \text{ с}$.

На рис. 3 зависимость выживаемости спор от глубины расположения тест-систем в макете построена по экспериментальным данным с учетом рассчитанной продолжительности облучения 30 мин. Видно, что кривая выживаемости спор не имеет монотонного (классического) вида, как это имеет место при γ -облучении микроорганизмов. Немонотонное поглощение энергии пучково-плазменного разряда в толще бумаги, а также относительная выживаемость в зависимости от глубины расположения тест-систем $B_{\text{а6с}}/B_0 = f(D)$ обусловлены реакцией ионизации в толще бумажного материала. По мере замедления электронов при углублении в вещество стерилизуемого объекта повышаются ионизационные потери. Кроме того, растет число вторичных и обратнорассеянных электронов из более глубоких слоев вещества. Поэтому при малой глубине поглощенная энергия увеличивается. Начиная с некоторой глубины существенным становится уменьшение числа электронов, двигающихся в первоначальном направлении. Меньше становится и обратнорассеянных электронов, что приводит к спаду поглощенной дозы в более глубоких слоях вещества. Перечисленные процессы приводят к образованию максимума на кривой поглощения. Спад на переднем и заднем участках максимума объясняется процессами отражения и рассеяния электронов на границе раздела вещество—воздух. Аналогичная картина поглощенной дозы наблюдается в толще полиэтиленовой пленки [6].

На рис. 3 видно, что после прохождения толщи бумаги в направлении движения энергичных электронов поглощенная доза электронного облучения снижается до минимальной, соответствующей заданной для стерилизации ($B_{\text{а6с}}/B_0 = 3,3 \cdot 10^{-6}$). В слоях 3—4 δ , где $\delta = 128$ листов толщиной по 0,15 мм, отмечается наибольший эффект подавления роста спор. В этих слоях поглощенная доза максимальна.

Таким образом, при 30-минутном облучении почтовых отправок электро-нами энергией 9 МэВ заданный критерий стерилизации $3,3 \cdot 10^{-6}$ обеспечивается до толщины слоя бумаги 3—4 δ . Эксперименты показали, что увеличение заданной глубины стерилизации (толщины слоя) бумаги можно обеспечить за счет повышения мощности экспозиционной дозы, энергии пучка электронов и продолжительности облучения.

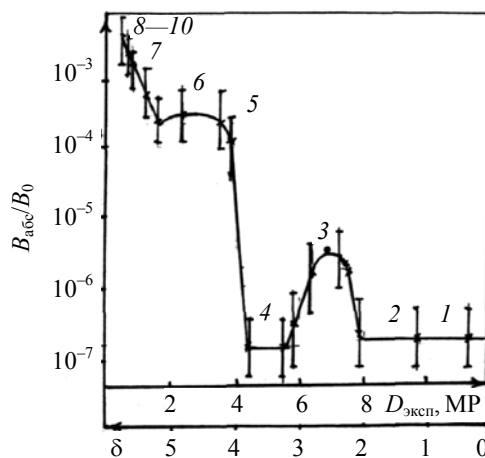
С увеличением мощности экспозиционной дозы существенно снижается поглощенная летальная доза многих споровых микроорганизмов [7]. Это позволяет снизить среднюю поглощенную дозу при стерилизации и, таким образом, сохранить прочностные и другие свойства бумаги.

По экологическим соображениям повышение энергии пучка электронов допустимо лишь до 10 МэВ. Наиболее целесообразным оказалось увеличение продолжительности облучения. Эксперименты показали, что таким образом глубину стерилизуемого слоя в коробке можно довести до 5—6 δ .

Исследование остаточных явлений в бумаге после радиационного облучения. После радиационной обработки в режимах, обеспечивающих стерилизацию тест-систем, исследовали механические свойства бумаги и степень сохранения нанесенной на нее информации. В экспериментах использовали рекламные журналы, газетную и фильтровальную бумагу. В результате установлено, что механическое свойство рекламных буклетов — прочность на излом снижается не более чем на 5% по сравнению с необлученными образцами. Объемная масса, набухание бумаги также не претерпели больших изменений по данным микроскопического контроля. Информация сохранялась полностью. Не изменялась белизна бумаги — ни сразу после облучения, ни со временем после радиационной стерилизации. Газетная бумага оказалась более чувствительной к облучению. При толщине листов более 85 мкм прочность на разрыв и излом бумаги снижались на 15%. Уменьшение механической прочности объясняется радиационной деструкцией микроволокон целлюлозы в результате разрыва межатомных связей под воздействием электронов. При осмотре можно было наблюдать укорочение микроволокон в местах разрыва.

Наиболее чувствительной к радиации оказалась фильтровальная бумага, потеря механических свойств которой составляла 20%. Бумага имеет сложный гетерогенный состав, характеризующийся анизотропией структуры. Поэтому в бумаге с постоянной массой (отклонение не более 20%) возможны колебания основных свойств — толщины $\pm 5\%$, сопротивления разрыву $\pm 20\%$.

Таким образом, почтовые отправления в виде стандартных упаковок бумажной корреспонденции в картонных коробках размером 600×600×600 мм и толщиной до 768 листов, зараженные споровыми культурами, могут быть надежно в течение 30 мин простерилизованы электронным пучком линейного ускорителя энергией



Р и с. 3. Зависимость выживаемости спор от экспозиционной дозы ионизирующего излучения: 1—10 — номер тест-системы и пленочных дозиметров; δ — число листов в журнале: $\delta = 228$, $5\delta = 1140$

9—10 МэВ. Стерилизация почтовых отправок с помощью источника γ -излучения средней энергией 1,33 МэВ достигается при использовании установки ГУТ-200М в течение 4 сут. Метод применим также для долговременного хранения архивных, музейных и прочих материалов.

На основе экспериментальных данных, представленных в настоящей работе, предложена технология промышленной стерилизации почтовых отправок.

Настоящая работа выполнена межведомственным коллективом сотрудников РНЦ «Курчатовский ин-т», ОАО «Биохиммаш», ПО «Мосмедпрепараты» им. Л.Я. Карпова. Большую экспериментальную помощь на стадии разработки метода радиационной стерилизации оказали В.Д. Русанов, Н.В. Знаменский, В.В. Петренко, Я.И. Штромбах, Л.В. Неумывакин, предоставившие необходимые радиационные установки и технические приборы. В работе приняли участие коллективы экспериментаторов, в которые входили В.П. Денисенко, Д.Д. Масленников, Н.П. Алтухова, А.В. Галь, В.Л. Ширяевский, Л.Ф. Безбородова, Н.Г. Мисюрева, Г.И. Тихонов, А.А. Фридман. Всем им авторы приносят благодарность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рожняковский Т., Жултовский З. Биологическая война. Угроза и действительность. Пер. с польского. М.: Изд-во иностр. лит., 1959. 330 с.
2. Ауслендер В.Л., Ведерников В.А., Грачев М.А. и др. Стерилизация почтовой корреспонденции промышленным ускорителем электронов. — Докл. Акад. наук, 2002, № 3, с. 412—415.
3. Воробьев А.А., Боев Б.В., Бондаренко В.М., Гинзбург А.Л. Классификация микроорганизмов, пригодных для биотерроризма. — Микробиология, 2002, № 3, с. 30—34.
4. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Требования к контролю и мониторингу для поддержания постоянного соответствия. ГОСТ Р. ИСО 14644-1, 2002, ч. 1, с. 1—4.
5. Лобанов Н.С., Зиновьев О.А. Новые детекторы нейтронного, гамма- и рентгеновского излучений. — Приборы и техн. экспер., 2002, № 4, с. 59—62.
6. Зиновьев О.А., Найденов А.Я. Стерилизация бумажных поверхностей пучково-плазменным разрядом. — Технология чистоты, 2002, № 1, с. 25—28.
7. Долгачев Г.И., Зиновьев О.А., Закатов Л.П., Юзбашев В.Г. Способ стерилизации объектов медицинского и пищевого оборудования. Патент 2076787 МПК А61 L 2/08. — Бюл. изобрет., 1997, № 10, с. 110.

Поступила в Редакцию 15.04.05

УДК 504.45/53.064:621.039.58:546.36/42

^{137}Cs И ^{90}Sr В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ В 1987—2002 гг.

*Вакуловский С.М., Газиев Я.И., Колесникова Л.В., Петренко Г.И.,
Тертышник Э.Г., Уваров А.Д. (НПО «Тайфун»)*

Юго-западные районы Брянской области больше всего пострадали от аварии на Чернобыльской АЭС. Загрязнение этой территории ^{137}Cs приведено в табл. 1. Загрязнение ^{90}Sr оказалось в 10 раз меньше. По результатам радиационного мониторинга установлено, что с течением времени уменьшение содержания указанных радионуклидов в почве происходит преимущественно за счет их радиоактивного распада. Миграция обоих радионуклидов влияет, главным образом, на вертикаль-