

Глава 4. Радиационные технологии на основе ускорителей типа УРТ

4.1. Введение

Достоинства радиационных технологий (РТ) рассмотрены выше (во введении) и приведены в табл. 4.1. В данной главе главное внимание уделялось разработке основ РТ с использованием наносекундных ускорителей электронов (НУЭ), при этом был выполнен широкий охват возможных областей применения НУЭ, а также выработаны требования к параметрам НУЭ для исследованных РТ.

Как уже отмечалось, электронный пучок, сформированный НУЭ, имеет как достоинства, так и недостатки. Поэтому актуальна задача найти такие РТ, в которых недостатки наносекундного электронного пучка (НЭП) будут несущественны, а достоинства применения (как и самой РТ) будут в результате настолько существенны, что удастся преодолеть барьер внедрения новой техники в жизнь.

4.2. Исследование возможности применения наносекундного электронного пучка для очистки воды

Загрязнение окружающей среды вызывает потребность в обеззараживании природных и сточных вод. Наиболее распространенный способ в настоящее время - химическая дезинфекция воды, которая состоит либо в хлорировании, либо в озонировании [4.1]. Однако хлорирование приводит к образованию в обеззараженной воде токсичных хлорорганических соединений, а озонирование - к образованию как биоразлагаемой органики, так и сложных органических соединений. Общим недостатком химической дезинфекции можно считать невозможность воздействия на микроорганизмы, находящиеся внутри взвешенных частиц.

Альтернативой является радиационная обработка вследствие ее универсального поражающего действия на любые биологические объекты. Для обеззараживания природных и сточных вод использовались как гамма-излучение изотопов, так и электроны, ускоренные на ускорителях постоянного действия, с энергией 0,3-1 МэВ. При этом доза радиационной стерилизации (независимо от вида излучения) для сточных вод не превышает 4 кГр, а природных - 1 кГр [4.2]. Кроме того, радиация также применяется для очистки воды от широкого спектра загрязнений (табл. 4.2). Механизм действия радиации на разложение примесей основан на результатах радиолиза воды [4.3].

Таблица 4.1. Радиационные технологии на основе НУЭ

Технология	Достоинства	Области применения
Генерация озона из воздуха	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Отсутствие необходимости предварительной осушки, очистки и стабилизации температуры подаваемого под пучок воздуха; ◆ Конкурентоспособна по энергозатратам с электроразрядным методом 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Для очистки и аэрации сточных вод; ◆ Для дезинфекции и очистки питьевой воды; ◆ Для дезинфекции и деаэрации помещений в медицине и пищевой промышленности; ◆ Для поддержания микроклимата, например в птичниках
Стерилизация и очистка воды	<ul style="list-style-type: none"> ● Сочетание биологической и химической очистки; ● Отсутствие расходных компонентов; ● По затратам сопоставима с озонированием 	Подготовка воды в чрезвычайных ситуациях
Радиационная стерилизация	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Использование для упаковки газоплотных материалов (фольги); ✓ Возможность поверхностной стерилизации при одностороннем облучении; ✓ Мгновенность действия 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Стерилизация медицинских изделий, инструмента и материалов; ✓ Стерилизация комбикорма; ✓ Стерилизация стеклянной тары для медицинских препаратов и пищевых продуктов
Радиационная стерилизация жидких пищевых продуктов	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Высокая эффективность по всем видам микроорганизмов и вирусов; ❖ Низкие энергозатраты; ❖ Безвредность; ❖ Отсутствие расходных компонентов 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Меланж; ❖ Молочные и кисломолочные изделия; ❖ Пиво и т.п.
Радиационная полимеризация и сополимеризация	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Высокая эффективность; ◆ Быстрота процесса; ◆ Низкие энергозатраты 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Создание покрытий; ◆ Модификация поверхностей полимерных пленок.

Таблица 4.2. Поглощенная доза, требуемая для снижения концентрации вещества в водном растворе в 100 раз (по литературным данным)

Вещество	Исходная концентрация, мг/л	Число ПДК	Доза, крад
Трихлорэтилен	9,76*10 ⁻²	1.6	57
	0,989	16.5	64
	6,42	107	106
Тетрахлорэтилен	0,116	3.8	351
	0,597	20	299
	2,89	96	442
Хлороформ	0,101	1.68	586
	1,37	22.8	592
	6,13	102	1004
Бензол	0,125	0.25	56
	1,6	3.2	72
	4,29	8.6	200
Толуол	3,49*10 ⁻²	0.07	50
	0,67	1.3	65
	4,87	9.7	169
Фенол	1,43	1430	42
	11,8	10 000	221
	58,9	60 000	1110

В литературных данных по поверхностной стерилизации НЭП [4.3] указывается на высокую эффективность использования таких пучков. Поэтому было решено проверить влияние НЭП на микроорганизмы в воде [4.4].

В экспериментах использовались герметичные кюветы из нержавеющей стали (рис.4.1) глубиной 1,5 мм с начальной концентрацией микроорганизмов *Coli-fomes*, *Salmonella enteritidies*, *Staphylococcus aureus* от 10⁵ до 10⁹ 1/мл (одновременно каждого типа) в физиологическом растворе. Санитарный микробиологический анализ выполнялся методом посева на диагностические питательные среды [4.5].

Облучение кювет с микроорганизмами проводилось при комнатной температуре на частотном импульсном ускорителе "Руслан" [4.6] (энергия электронов 700 кэВ, ток пучка электронов до 5000 А, длительность импульса на полувывсоте 26 нс, частота повторения импульсов 1-10 Гц, площадь пучка 60*10 см²). Осциллограмма напряжения ускорителя приведена на рис. 4.2.

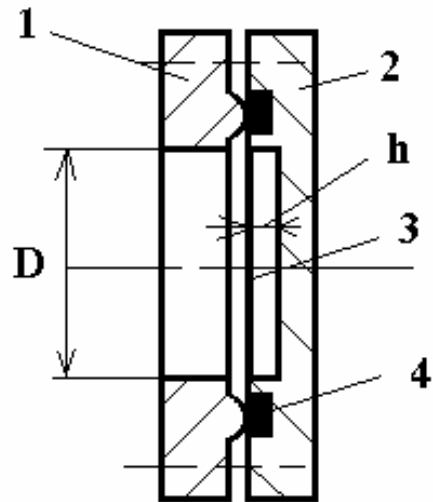


Рис. 4.1. Схема кюветы:
 1-крышка, 2 - корпус, 3 - фольга, 4- -прокладка,
 $D=50$ мм и $h=1,5$ - диаметр и глубина ванны в кювете

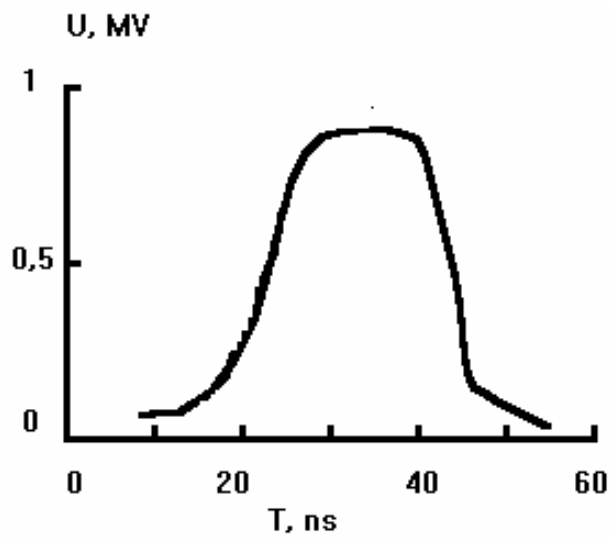


Рис. 4.2. Осциллограмма импульса напряжения ускорителя «Руслан»

Для измерений поглощенной дозы НЭП использовали пленочные пластиковые детекторы ЦДП -2-Ф2 [4.7]. Выполнено измерение поля поглощенной дозы в воде по глубине облучения. Результаты экспериментов и рассчитанное (по [4.8]) распределение поглощенной дозы для моноэнергетичных электронов приведены на рис. 4.3. Величина поглощенной дозы на задней (дальней) стенке ванны кюветы принята стерилизующей, так как она наименьшая во всем объеме кюветы.

Проведены эксперименты по облучению равной поглощенной дозой кювет с различной начальной концентрацией микроорганизмов. Затем исследовано влияние перемешивания раствора в процессе облучения на гибель микроорганизмов. Перемешивание осуществлялось встряхиванием кювет. Результаты экспериментов приведены в табл. 4.3.

Как видно из экспериментальных данных, поглощенная доза НЭП, необходимая для полной стерилизации, для смеси с начальной концентрацией микроорганизмов по 10^9 1/мл каждого вида в физиологическом растворе составляет 4 кГр, при этом поглощенная доза на поверхности равна 12,8 кГр.

Таблица 4.3. Результаты облучения

№	D_0 , кГр	N_0 , 1/мл	n_0	n_1	N_2	n_3	n_4	Встряхивание
1	12,8	10^9	503	332	61	5	no gr.	Нет
2	12,8	10^7	248	62	2	no gr.	no gr.	Нет
3	12,8	10^5	3	no gr.	no gr.	no gr.	no gr.	Нет
4	11,1	10^9	711	200	39	2	no gr.	Нет
5	11,1	10^9	55	8	1	no gr.	no gr.	Есть
6	9,8	10^9	2048	211	42	2	no gr.	Нет
7	9,8	10^9	15	1	no gr.	no gr.	no gr.	Есть

Примечание N_0 - начальная концентрация микроорганизмов; n_i - количество колоний на 1 мл после облучения, где $i=1,2,\dots$ - порядок разведения облученной культуры при высевании на питательную среду, D_0 - поглощенная доза на поверхности кюветы, no gr. - роста микроорганизмов нет.

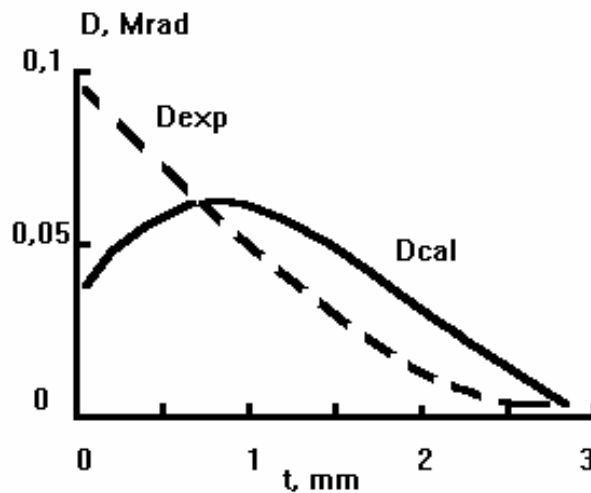


Рис. 4.3. Распределение поглощенной дозы в воде по глубине t :
 D_{cal} - расчетное; D_{exp} - измеренное

Результаты экспериментов по облучению примерно равной дозой микроорганизмов с различной начальной концентрацией показали (см. табл. 4.3), что количество выживших микроорганизмов определяется величиной поглощенной дозы и не зависит от начальной концентрации. Это не согласуется с данными [4.9], которые получены для гамма-излучения и постоянных электронных пучков и показывают, что увеличение концентрации микроорганизмов повышает их радиостойчивость.

Установлено сильное влияние перемешивания раствора в процессе облучения на гибель микроорганизмов. Так, однократное встряхивание кюветы на половинной дозе приводит к уменьшению числа выживших микроорганизмов более чем на порядок (табл. 4.3, № 4,5). При трехкратном встряхивании кюветы через каждую $1/4$ полной дозы число выживших микроорганизмов снижается на два порядка (№ 6,7). Такое сильное влияние перемешивания нельзя объяснить только выравниванием дозы по объему кюветы, поскольку различие между дозой на поверхности и дозой на задней стенке кюветы (при ее глубине 1,5 мм) меньше одного порядка (рис. 4.3). В работе [4.9] приведены данные о том, что встряхивание суспензии в присутствии кислорода снижает радиостойчивость микроорганизмов, но в нашем случае кювета герметично закрыта и возможность диффузии кислорода в суспензию отсутствует.

Возможным механизмом влияния встряхивания может быть снижение концентрации микроорганизмов при перемешивания (в верхних слоях они быстрее погибают),

однако это противоречит данным о том, что концентрация микроорганизмов не влияет на их радиостойчивость.

Ранее [4.3] обнаружено трехкратное снижение летальных доз для различных видов микроорганизмов при использовании НЭП для поверхностной стерилизации. В нашем случае при объемной стерилизации можно ожидать еще более сильного снижения летальных доз, если предположить, что за эффект отвечают вторичные факторы, возникающие при торможении НЭП и способные проникать на большую глубину, чем электроны (рентгеновское, СВЧ – и ультрафиолетовое излучения, ударная волна и др.). Кроме того, возможным механизмом может быть сосредоточение воздействия на микроорганизмы продуктов радиолиза (радикалов и т.п.) в очень короткий промежуток времени, создающих эффект отравления.

Из полученных данных можно сделать вывод о том, что при облучении воды из природных водоисточников с характерным загрязнением на уровне 10^5 1/мл для получения питьевой воды требуется доза на уровне 2,5 кГр. С учетом того, что в процессе облучения может быть устроено активное перемешивание воды, требуемую величину дозы на задней стенке можно установить на уровне 1-1,5 кГр. Однако при сильном перемешивании воды вопрос о соотношении дозы на поверхности и задней стенке становится нетривиальным и требует дополнительных исследований.

Для проверки полученных данных выполнено облучение воды из Верх-Исетского пруда (источник питьевого водоснабжения г. Екатеринбурга). Для герметизации кювет (рис. 4.1, $h=2$ мм) использовалась полиэтиленовая пленка толщиной 50 мкм. В процессе облучения неоднократно встряхивали кюветы. Поглощенная доза на поверхности и задней стенке кюветы составляла 14 и 1,3 кГр соответственно. Облученная вода оказалась стерильной, тогда как в контрольной пробе коли – индекс составлял 70 000.

Поглощенная доза 1,3 кГр соответствует затратам энергии на очистку 1 м воды в размере 1,4 кВтч (при 25% КПД передачи энергии в пучок), что сопоставимо с расходом энергии при озонировании.

Данные [4.4] позволяют с уверенностью говорить не только об эффективности использования НЭП для очистки воды, но и о конкурентоспособности этого метода, в силу его комплексности воздействия. Производительность метода определяется требуемой поглощенной дозой излучения, которая зависит от степени и характера загрязнений, но с учетом наших предварительных данных по дезинфекции воды можно говорить о стерилизующей поглощенной дозе излучения на уровне 3 кГр при исходном

коли-индексе на уровне 240 000 (индекс загрязненности водного объекта 2). Одновременно при такой дозе происходит существенная очистка воды от большинства токсичных соединений, если их концентрация не превышает 10 ПДК. Возможна очистка и более загрязненной воды посредством увеличения дозы. Например, при поглощенной дозе 8 кГр концентрация примесей, по данным американских ученых, снижается в 100 раз (табл. 4.2). Связано это с тем, что механизм воздействия ионизирующего излучения на органические соединения в водных растворах имеет особенность в том, что действие оказывают не электроны, а продукты радиолиза воды, которые в силу их высокой реакционной способности длительно не существуют и дополнительно не загрязняют воду.

К достоинствам использования НЭП для очистки воды относятся: компактность, быстрота обработки, отсутствие расходных компонентов и универсальность. Это особенно важно в зонах чрезвычайных ситуаций.

На основе параметров ускорителя УРТ-0,5 [4.10] выполнен расчет установки для очистки воды в двух вариантах (для поглощенных доз 12 и 2 кГр) - полной стерилизации воды и доведения ее до соответствия ГОСТу соответственно (табл. 4.4). Общая схема установки показана на рис. 4.4. Суммарная масса установки с биологической защитой не превысит 1,5 т, что позволяет создать мобильный вариант для обеспечения водой в районах чрезвычайных ситуаций. Главное достоинство - отсутствие расходных компонентов, гибкость и комплексность очистки.

Питание установки возможно от мотора - генератора и(или) стационарной сети. Установка должна размещаться в спецкабине, обеспечивающей поддержание нормальных условий работы ускорителя ($10...30^{\circ}\text{C}$).

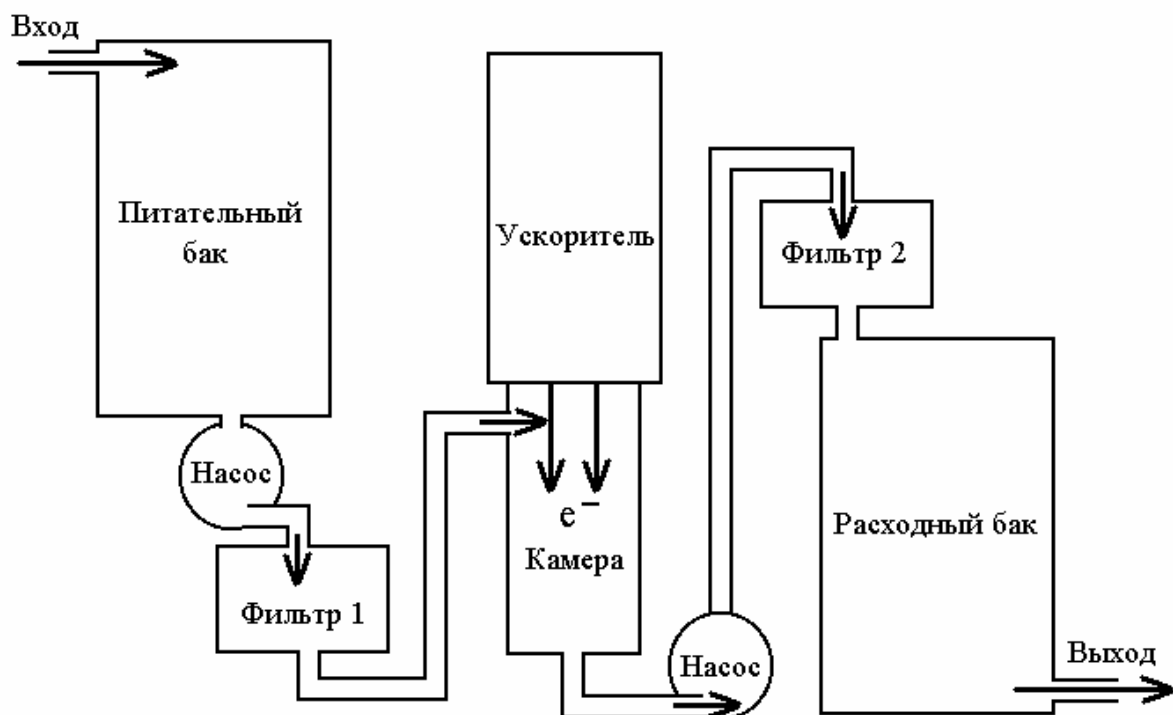


Рис. 4.4. Схема установки для очистки воды

Таблица 4.4 . Результаты расчета установки для очистки воды.

№ п.п.	Параметр	Вариант 1			Вариант 2		
1	Требуемая доза (ТД), кГр	12			2		
2	Размеры пучка						
	длина, см	10			10		
	ширина, см	10			10		
3	Толщина слоя воды (двухстороннее облучение), см	0,3			0,3		
4	Энергия электронов, МэВ	0,5			0,5		
5	Ток пучка, А	200			200		
6	Длительность на 0.9, нс	50			50		
7	Поверхностная доза за импульс, кГр	10			10		
8	Частота работы ускорителя, Гц	50	100	200	50	100	200
9	Мощность установки, Вт	750	1500	3000	750	1500	3000
10	Время набора ТД, с	0,24	0,12	0,06	0,04	0,02	0,01
11	Скорость прокачки воды, см/с	6,9	13,9	27,8	41,7	83,3	166,7
12	Производительность, л/час	75	150	300	450	900	1800
13	Расход электроэнергии, кВт*ч/м ³	10,00			1,67		
14	Потребляемая мощность, кВт	1,75	2,5	4	1,75	2,5	4

4.3. Исследование возможности применения наносекундного электронного пучка НЭП для стерилизации продуктов

4.3.1. Введение

Продукты питания должны быть безопасны для потребителя. Одним из факторов опасности является микробиологическая загрязненность, поэтому в производстве пищевых продуктов ведется непрерывный микробиологический контроль. При этом контроль микробиологической загрязненности включает контроль как общей микробиологической загрязненности, так и наличия(отсутствия) отдельных видов особо опасных патогенных микроорганизмов. Требуемый уровень микробиологической безопасности достигается за счет применения комплекса санитарно-гигиенических мер при изготовлении и расфасовке пищевых продуктов. В настоящее время практически единственным способом снижения микробиологической загрязненности пищевых продуктов является термическая обработка. Однако термическая стерилизация ведет к необратимому изменению свойств сырья, что не всегда допустимо. Применяемые химические способы, например засаливание, засахаривание, приводят к тому же результату. Поэтому для увеличения сроков хранения пищевых продуктов широко применяется термическая пастеризация с последующим охлаждением до температур, при которых размножение микроорганизмов затруднено. Альтернативой является радиационная стерилизация вследствие универсальности поражающего действия ионизирующего излучения на любые биологические объекты. При этом доза радиационной стерилизации (независимо от вида излучения) не превышает 25 кГр [4.9].

Небольшая глубина пробега НЭП, связанная с относительно небольшой энергией электронов (до 1 МэВ), делает крайне проблематичной применение НЭП для облучения твердых продуктов. Однако вполне возможно использование НЭП для обработки жидких и сыпучих материалов, которые можно тонким слоем пропускать под пучком. При этом требуемая производительность будет достигаться за счет большой скорости перемещения продукта под пучком.

Исходя из этих соображений исследование возможности применения НЭП для пастеризации и стерилизации жидких продуктов проверялась на меланже. Работа выполнялась по договору с ЗАО «Чебаркульская птица», г. Чебаркуль Челябинской области.

При производстве меланжа используют пастеризацию [4.11], продолжительность пастеризации 40 с при температуре 60⁰С, при этом погибает 98-99% вегетативной микрофлоры. Однако данный метод имеет недостатки. Во-первых, требуются существенные энергозатраты на проведение пастеризации. Во-вторых, она не дает

венные энергозатраты на проведение пастеризации. Во-вторых, она не дает полного уничтожения патогенных микроорганизмов [4.2], что приводит к необходимости переработки зараженного меланжа в яичный порошок, а значит экономически не выгодно.

4.3.2. Описание эксперимента

При разработке основ технологии радиационной стерилизации меланжа имеется несколько проблем. Одна из них неоднородность поглощенной дозы по глубине, что связано с небольшой проникающей способностью ускоренных электронов. Другая проблема состоит в изменении потребительских свойств меланжа при облучении за счет радиолитического, прежде всего при взаимодействии с атмосферным кислородом.

Поставленная цель достигается тем, что меланж обрабатывается электронным пучком в бескислородной атмосфере в специальной камере облучения (рис. 4.5). Камера состоит из выходной фольги 1 ускорителя, выходного фланца с ребрами жесткости 3 для поддержки выходной фольги и задней крышки 2 с отверстиями для подвода и отвода меланжа, которые выполнены так, что поток меланжа в камере направляется перпендикулярно прогибам выходной фольги, создающимся при вакуумировании между ребер жесткости выходного фланца. Это позволяет использовать прогибы в качестве рассекателей потока для эффективного перемешивания меланжа при его прокачке и сокращает неравномерность облучения по глубине.

Для экспериментальной проверки был создан макет установки стерилизации меланжа с технологической схемой, представленной на рис. 4.6. Она позволяет проводить обработку меланжа в выбранной бескислородной атмосфере (аргона, углекислого газа или азота), уменьшая воздействие продуктов радиолитического воздуха на сырье. Расходная емкость представляет собой бак из нержавеющей стали, в качестве приемной емкости использовались стеклянные банки объемом 1 л с полиэтиленовыми крышками, через отверстие в которых вводился трубопровод с зазором, обеспечивающим стравливание избытка газа. Герметизация приемных емкостей для проведения анализов производилась целыми полиэтиленовыми крышками. В качестве трубопроводов использовались пластиковые трубки.

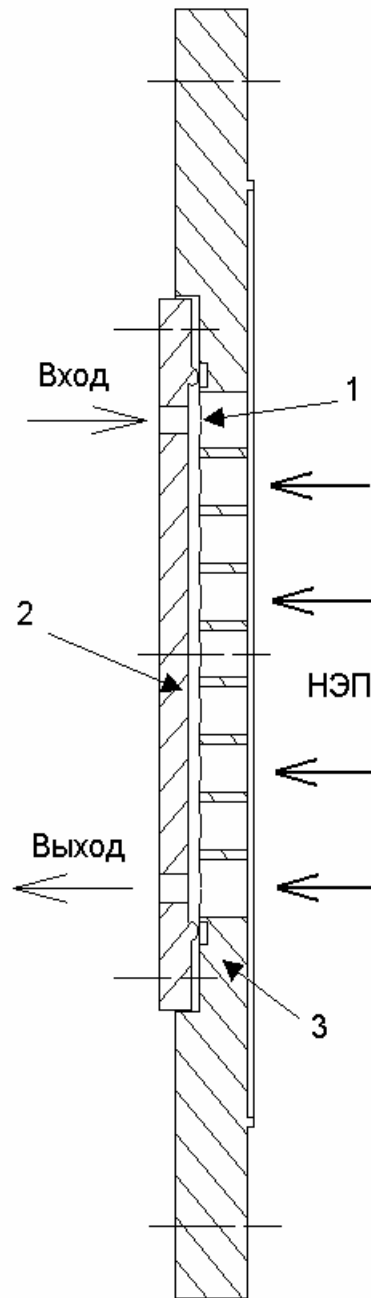


Рис. 4.5. Камера облучения:
1- выходная фольга, 2 - задняя крышка 3- выходной фланец

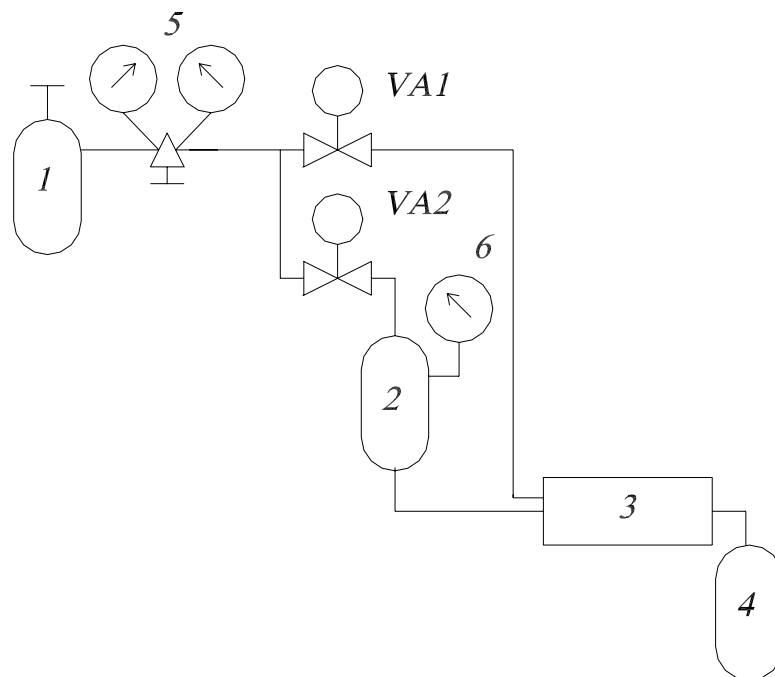


Рис. 4.6. Технологическая схема устройства для стерилизации меланжа:
 1 - газовый баллон, 2 - расходная емкость, 3- камера облучения, 4 - приемная емкость,
 5- газовый редуктор, 6- электроконтактный манометр, VA1, VA2- электромагнитные
 клапаны

Камера облучения образована выходной фольгой ускорителя электронов [4.10] и фланцем из нержавеющей стали, зазор между которыми был не более 1 мм (исходя из глубины пробега электронов с энергией до 0,5 МэВ). На краях фланца имеются штуцеры для трубопроводов подачи и отвода меланжа, диаметр отверстий в них 3 мм. Фланец устанавливался так, чтобы на оси расположения штуцеров (т.е. потока меланжа) находились ребра жесткости анодного фланца, поддерживающие выходную фольгу.

Эксперимент проводился следующим образом.

1. Перед работой вся система промывалась и стерилизовалась в сборе озоном, образующимся при облучении воздуха, находящегося в системе, при этом выводной трубопровод пережимался;
2. Приемные емкости стерилизовались отдельно;
3. Меланж загружается в расходный бак, который установлен ниже уровня камеры облучения, что исключает попадание меланжа самотеком;

4. Открыванием вентиля VA1 производится 1-2 минутная продувка трубопроводов и камеры облучения, затем включается ускоритель электронов;
5. Открыванием вентиля VA2 производится наполнение расходной емкости газом для подачи меланжа в камеру, где выполняется его облучение;
6. Электроконтактный манометр управляет открыванием вентиля VA2 для поддержания необходимого давления газа в расходной емкости, чем задается скорость потока меланжа в камере облучения;
7. После окончания обработки вентиль VA2 закрывается, ускоритель выключается, приемная емкость герметизируется.

Ускоритель работал на частоте до 50 Гц, которая задавалась исходя из условия получения необходимой поглощенной дозы (до 50 кГр) при движении потока меланжа в камере облучения со скоростью до 10 см/с (задавалась давлением в расходной емкости). Измерения поглощенной дозы электронного пучка выполнялись с помощью дозиметрических пленок типа ЦДП -2-Ф2 [4.7].

Для получения достоверных данных о воздействии электронного пучка пробы заражались микроорганизмами *Salmonella* концентрацией 100 1/мл. Приготовление зараженных проб и анализы на содержание МАФАИМ, БГКП и *Salmonella* выполнялись в отделе особо опасных инфекций Свердловского областного центра ГСЭН по стандартной методике.

На втором этапе были выполнены эксперименты по определению влияния поглощенной дозы на свойства меланжа. Его приготавливали из яиц непосредственно перед облучением. Проба объемом около 1000 мл заливалась в расходный бак. Начальный уровень используемой поглощенной дозы составлял 15 кГр, при этом максимальная поглощенная доза на поверхности камеры облучения не превышала 50 кГр. Далее были выполнены измерения с меньшим уровнем поглощенных доз.

4.3.3. Результаты экспериментов и их обсуждение

На первом этапе экспериментов установлено [4.12], что стерильность проб меланжа наблюдается при поглощенной дозе на поверхности пробы 30 кГр, поглощенная доза на задней стороне камеры облучения составляла не более 5 кГр.

Проверка свойств меланжа на втором этапе экспериментов после облучения на соответствие Сан. ПиН 2.3.2.560-96 (см. раздел 6.1) выполнялась в лабораториях Свердловского областного центра СЭН по стандартным методикам. В процессе экспериментов не установлено изменения физико-химических и потребительских свойств

меланжа при поглощенной дозе до 50 кГр. Результаты измерений приведены в табл. 4.5 и 4.6.

Полученные результаты показывают, что изменения потребительских свойств меланжа не происходит при поглощенной дозе до 50 кГр. Установлено незначительное снижение рН меланжа пропорционально поглощенной дозе, и увеличение массовой доли белка. Однако величина обнаруженных изменений состава меланжа незначительна и близка к погрешности измерений. Кроме того, установлено, что испытанная технология не приводит к вторичному загрязнению обрабатываемых продуктов. На способ стерилизации меланжа получен патент РФ [4.13].

На основе полученных данных наиболее целесообразно использовать для стерилизации меланжа камеру облучения, которая будет образована выходными фольгами вакуумного диода для двухстороннего облучения (см. главу 1). Это позволит не только увеличить зазор между фольгами до 2 мм, но и получить увеличение производительности за счет более равномерного распределения дозы в потоке меланжа не только за счет геометрии двухстороннего облучения, но эффективного перемешивания потока меланжа в камере на прогибах выходных фольг. Выполненный расчет показал, что на основе ускорителя УРТ-0,5 с вакуумным диодом для двухстороннего облучения можно создать технологическую линию производительностью 0,5 т/ч, а ускорителя УРТ-1 около 5 т/ч. Отметим, что типовое значение производительности оборудования, используемого при переработке меланжа, лежит в диапазоне 0,3-10 т/ч [4.11].

Таблица 4.5. Количественный химический анализ

№ п.п.	Определяемые показатели	Результаты Исследований, ед. изм.	Величина допустимого уровня, ед. изм.	НД на методы исследований
Проба №1 - без облучения				
1	М.Д. сухих веществ	23,4+2,3%	Не менее 25%	ГОСТ 30364.1-97
2	М.Д. белка	9,8%	Не менее 10%	ГОСТ 25011-81
3	рН	8,1	Не менее 7	ГОСТ 36781-85
Проба №2 - поглощенная доза до 50 кГр				
1	М.Д. сухих веществ	24,57%	Не менее 25%	ГОСТ 30364.1-97
2	М.Д. белка	12,89%	Не менее 10%	ГОСТ 25011-81
3	рН	7,97	Не менее 7	ГОСТ 36781-85
Проба №3 - поглощенная доза до 30 кГр				
1	М.Д. сухих веществ	24,72+0.7%	Не менее 25%	ГОСТ 30364.1-97
2	М.Д. белка	12,73%	Не менее 10%	ГОСТ 25011-81
3	рН	8	Не менее 7	ГОСТ 36781-85

Таблица 4.6. Микробиологические испытания

№ п.п.	Определяемые показатели	Результаты исследований, ед. изм.	Величина допустимого уровня, ед. изм.	НД на методы исследований
Проба №1 - без облучения				
1	МАФАМ	$2 \cdot 10^4$ КОЕ/г	$5 \cdot 10^5$ КОЕ/г	ГОСТ 30364.2-96
2	БГКП	В 0,1 г не обн.	В 0,1 г не доп.	
3	Сальмонеллы	В 25 г не обн.	В 25 г не доп.	
4	Золотистый стафилококк	В 1 г не обн.	В 1 г не доп.	
5	Протей	В 1 г не обн.	В 1 г не доп.	
Проба №2 - поглощенная доза 50 кГр				
1	МАФАМ	$<10^4$ КОЕ/г	$5 \cdot 10^5$ КОЕ/г	ГОСТ 30364.2-96
2	БГКП	В 0,1 г не обн.	В 0,1 г не доп.	
3	Сальмонеллы	В 25 г не обн.	В 25 г не доп.	
4	Золотистый стафилококк	В 1 г не обн.	В 1 г не доп.	
5	Протей	В 1 г не обн.	В 1 г не доп.	
Проба №3 - поглощенная доза 30 кГр				
1	МАФАМ	$5 \cdot 10^4$ КОЕ/г	$5 \cdot 10^5$ КОЕ/г	ГОСТ 30364.2-96
2	БГКП	В 0,1 г не обн.	В 0,1 г не доп.	
3	Сальмонеллы	В 25 г не обн.	В 25 г не доп.	
4	Золотистый стафилококк	В 1 г не обн.	В 1 г не доп.	
5	Протей	В 1 г не обн.	В 1 г не доп.	

4.4. Исследование возможности применения НЭП для стерилизации медицинских изделий

4.4.1. Введение

Существующие способы стерилизации медицинских изделий можно разделить на термические, химические и физические [4.3]. Наиболее распространен термический способ, главными недостатками которого являются большой расход энергии и неприменимость для нетермостойких материалов. Химическая стерилизация герметично упакованных изделий, в том числе одноразовых, состоит в обработке летучим дезинфицирующим веществом, обычно окисью этилена [4.3], которая проходит через полиэтиленовую упаковку. Общим недостатком химической дезинфекции можно считать токсичность используемых веществ и, связанную с ней, необходимость дегазации перед использованием. Кроме того, в качестве упаковочных материалов широко распространены нетермостабильные и химически неустойчивые материалы: водостойкая бумага, алюминиевая фольга, полимерные пленки, которые не могут быть подвергнуты традиционным методам стерилизации. Неприменимы эти методы и в конвейерной технологии.

Из физических способов широко известно использование ультрафиолетового излучения, а также применяется радиационный [4.9], электрохимический [4.20] и другие методы. Недостатком большинства физических методов, кроме радиационного, является невозможность применения для стерилизации герметично упакованных изделий, как из-за больших потерь излучения в упаковке (ультрафиолетовое излучение), так и принципиально для электрохимического метода. Последний состоит в обработке деталей электрическим током высокой плотности (до 10 кА/дм^2) в растворе, что приводит к микроразрядам на поверхности деталей, которые и осуществляют стерилизацию.

Большими достоинствами обладает радиационная стерилизация [4.9] вследствие универсальности поражающего действия ионизирующего излучения на любые биологические объекты. Для радиационной стерилизации используются как гамма-излучение изотопов и реактора, так и ускоренные электроны. Эти источники применяют в основном для объемной стерилизации упаковок, поскольку энергетические характеристики излучений от них обеспечивают высокую проникающую способность. Относительно низкие мощности доз, которые дают изотопные источники, требуют для достижения стерилизующих доз продолжительного времени обработки (4-8 ч). При использовании ускорителей на высокие энергии (более 10 МэВ), хотя и достигается высокая скорость обработки, создается угроза активации объектов. При этом доза радиационной стерили-

зации (независимо от вида излучения) не превышает 25 кГр. Недостатком описанной радиационной стерилизации является ее повышенная опасность и как следствие необходимость дорогостоящей защиты для персонала при использовании изотопов и реактора и высокая стоимость используемых ускорителей постоянного тока. Все это ограничивает область применения радиационной стерилизации.

Между тем во многих случаях для стерилизации не требуется высокой проникающей способности радиации, а достаточно лишь поверхностной обработки, особенно если стерилизацию изделий выполнять до их упаковки во вторичную, используемую для перевозки, тару.

. В этом случае более важно обеспечить высокую скорость облучения, упростить технологическую оснастку и снизить затраты на защиту. Все это сделало актуальной задачу исследования биологического действия наносекундного электронного пучка (НЭП) к началу 80-х годов, так как существовавшие в литературе ограниченные данные в этой области характеризовались значительными противоречиями к моменту выполнения пионерной работы [4.14].

Создание НУЭ с ППТ позволяет перейти от экспериментов по исследованию воздействия НЭП на микроорганизмы к разработке основ технологии радиационной стерилизации для конкретных медицинских изделий. Ниже описывается методика разработки технологии радиационной стерилизации на примере работы, выполненной для образцов изделий ЗАО «Медин» и ООО «НВФ Интехнол», г. Екатеринбург.

4.4.2. Описание образцов изделий

Первый шаг методики разработки технологии радиационной стерилизации состоит в изучении обрабатываемых изделий, особенностей их конструкции и упаковки. Эксперименты производились с четырьмя образцами упакованных изделий, которые наиболее полно отражают номенклатуру выпускаемых указанными фирмами изделий и типы их упаковок. Исследование состава образцов дало следующие результаты.

1. Игла атравматическая №5/0 мононить полиамид (далее изделие №1). Упаковка одинарная “DIN”. Состав изделия (рис. 4.7):

- слой А - полиэтиленовый;
- слой Б – бумажный;
- слой В - бумажная подложка с иглой и нитью;

А	полиэтилен	0,909	0,409
Б	бумага	0,783	0,601
В	бумажная подложка с иглой	0,463	0,732
Г	бумага с покрытием		

Рис. 4.7. Игла атравматическая №5/0 мононить полиамид.

Схема упаковки изделия и распределение поглощенных доз между слоями. Значению 1 соответствует доза снаружи упаковки (на воздухе), составляющая 39,6 крад

А	полиэтилен	0,016	1,00085
Б	полиэтилен	0,11	0,52
В	бумага	0,41	0,23
Г	бумажная подложка с иглой	0,8	0,079
Д	бумага	0,93	0,0014
Е	бумага с покрытием		

Рис.4.8. Игла атравматическая №9/0 полипропиленовая мононить.

Схема упаковки изделия и распределение поглощенных доз между слоями.

Значению 1 соответствует доза снаружи упаковки (на воздухе), составляющая 47,06 крад

- слой Г - бумажный с полиэтиленовым покрытием внутренней стороны.

2. Игла атравматическая №9/0 полипропиленовая мононить (далее изделие №2). Упаковка двойная с внутренней упаковкой “DIN”, наружной отечественного производства, подложкой типа “книжка”. Состав изделия (рис.4.8):

- слои А, Б – полиэтиленовые;
- слои В, Д – бумажные;
- слой Г - бумажная подложка с иглой и нитью;
- слой Е - бумажный с полиэтиленовым покрытием внутренней стороны.

3. Игла атравматическая №8/0 полиэфирная мононить (далее изделие №3). Упаковка двойная с внутренней и наружной упаковками отечественного производства, подложкой типа “книжка”. Состав изделия (рис.4.9):

- слои А, Б – полиэтиленовые;
- слои В, Д – бумажные;
- слой Г - бумажная подложка с иглой и нитью;
- слой Е - бумажный с полиэтиленовым покрытием внутренней стороны.

4. Игла атравматическая №0 полиамидная мононить (далее изделие №4). Упаковка двойная с внутренней упаковкой “DIN”, наружной отечественного производства, подложкой типа “буклет”. Состав изделия (рис.4.10):

- слои А, Б – полиэтиленовые;
- слои В, Д, Е – бумажные;
- слой Г - бумажная подложка с иглой и нитью;
- слой Ж - бумажный с полиэтиленовым покрытием внутренней стороны.

В табл. 4.7 приведены результаты измерений и расчетные значения массы, площади и массовой плотности слоев изделий.

А	0,032	0,935	полиэтилен
Б	0,085	0,66	полиэтилен
В	0,35	0,23	бумага
Г	0,776	0,078	бумажная под- ложка с иглой
Д	0,93	0,03	бумага
Е			бумага с покрытием

Рис.4.9. Игла атравматическая №8/0 полиэфирная мононить.

Схема упаковки изделия и распределение поглощенных доз между слоями.
Значению 1 соответствует доза снаружи упаковки (на воздухе), составляющая 49 крад

А	0,033	1,06	полиэтилен
Б	0,026	0,68	полиэтилен
В	0,051	0,15	бумага
Г	0,26	0,04	бумажная под- ложка с иглой
Д	0,73	0,024	бумага
Е	0,96	0,029	бумага с покрыв- тием
Ж			

рис.4.10. Игла атравматическая №0 полиамидная мононить

Схема упаковки изделия и распределение поглощенных доз между слоями. Значению 1 соответствует доза снаружи упаковки (на воздухе), составляющая 48,73 крад

Таблица 4.7. Результаты измерений изделий и расчета параметров НУЭ для РТ

Параметр	Типоразмер			
	5/0	9/0	8/0	0
№ иглы				
Масса m_1 , г	1,07	1,07	0,75	1,14
Масса m_2 , г	0,33	0,74	0,71	0,75
Масса m_3 , г	0,75	0,65	0,59	1,24
Площадь S_1 , см ²	96,0	60,76	42,0	61,0
Площадь S_2 , см ²	40,26	44,55	29,25	47,36
Площадь S_3 , см ²	45,5	39,0	29,9	46,2
Массовая толщина ρ_1 , г/см ²	0,011	0,0176	0,0179	0,019
Массовая толщина ρ_2 , г/см ²	-	0,0166	0,0243	0,016
Массовая толщина ρ_3 , г/см ²	0,0165	0,0165	0,0198	0,027
Массовая толщина упаковки, г/см ²	0,011	0,0342	0,0422	0,035
Энергия электронов, необходимая для прострела упаковки, МэВ	0,151	0,205	0,224	0,207
Массовая толщина всего изделия, г/см ²	0,0275	0,0507	0,062	0,062
Энергия электронов, необходимая для прострела всего изделия, МэВ	0,19	0,244	0,27	0,27

Примечание Масса m_1 – суммарная масса слоев А и Г для изделия №1, А и Е – для изделий №2 и 3, А и Ж – для изделия №4; масса m_2 – суммарная масса слоев Б и Д для изделий №2 и 3, Б и Е – для изделия №4; масса m_3 – суммарная масса остальных слоев.

4.4.3. Выработка требований к параметрам НУЭ для стерилизации

Второй шаг методики разработки технологии радиационной стерилизации состоит в выработке требований к параметрам НУЭ, прежде всего к энергии электронов.

Важно оценить минимальную энергию $E_{\text{мин}}$, требуемую для прострела как самого изделия, так и его упаковки, если изделие монолитно и нуждается только в поверхностной стерилизации. Исходя из данных об экстраполированном пробеге электронов в воде (рис. 4.11 [4.15]) и зная массовую толщину изделия (или упаковки), можно найти энергию электронов, минимально достаточную для прострела. Данные для значений энергии электронов $E_{\text{мин}}$, минимально необходимой для полного прострела изделия, другими словами, экстраполированную длину свободного пробега электронов в воде, можно аппроксимировать выражением [4.15].

$$E_{\text{мин}} = -0,3519\rho_{\text{сум}}^2 + 2,3657\rho_{\text{сум}} + 0,1248 \text{ (МэВ)}, \quad (4.1)$$

где $\rho_{\text{сум}}$ – суммарная массовая толщина (поверхностная плотность) облучаемого изделия, г/см². Найденные по формуле (4.1) значения $E_{\text{мин}}$ для облучения рассматриваемых изделий и их упаковок приведены в табл. 4.7.

Заметим, что исходя из закона распределения поглощенной дозы для моноэнергетичных электронов (см. рис.4.3.) при энергии электронов, равной $E_{\text{мин}}$, поглощенная доза на передней (к пучку) поверхности изделия и на его задней стороне будут отличаться почти на два порядка. Так как под поглощенной дозой, необходимой для стерилизации изделия $D_{\text{ст}}$, понимается минимальная поглощенная доза в облучаемом объеме изделия, то за $D_{\text{ст}}$ будет приниматься поглощенная доза на задней стороне изделия, точнее, на внутренней стороне последней упаковки. Следовательно, неравномерность облучения (или поля поглощенной дозы), под которой понимается разница между максимальной и минимальной поглощенными дозами в изделии, которая обычно выражается в процентах, будет очень высокой.

Вообще, при разработке РТ на неравномерность облучения накладываются три основных ограничения, связанные:

- 1) с энергией электронов;
- 2) с радиационной стойкостью материалов;
- 3) с производительностью.

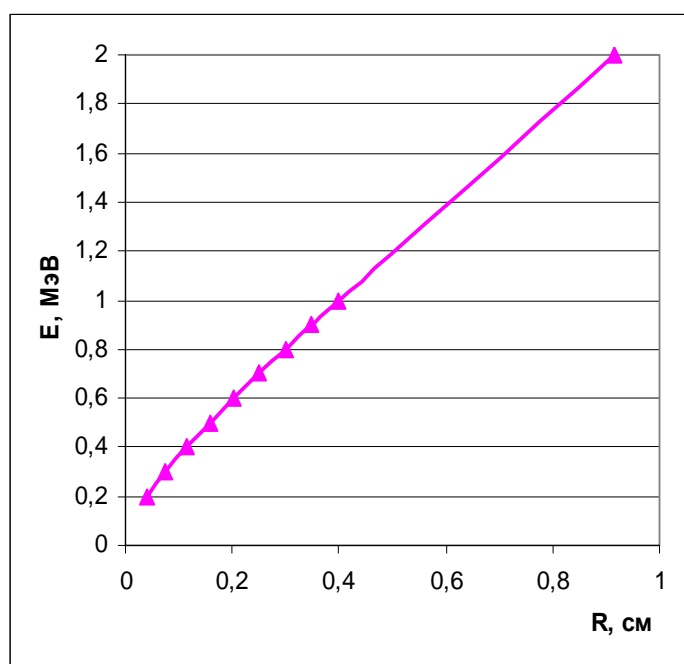


Рис. 4.11. Экстраполированный пробег электронов в воде

Ограничение, связанное с энергией электронов, т.е. способностью электронов облучить весь объем изделия, рассмотрено выше. Обсудим другие ограничения.

Ограничение по радиационной стойкости облучаемых материалов связано с наличием предельной поглощенной дозы D_{\max} , после которой облучаемый материал теряет или изменяет свои потребительские (химические, механические и др.). Для большинства полимерных материалов, применяемых для создания одноразовых медицинских изделий, $D_{\max} \approx 100$ кГр, а $D_{\text{ст}} \approx 25$ кГр, поэтому неравномерность облучения не должна превышать 400%.

Ограничение неравномерности облучения по производительности РТ состоит в том, что чем меньше неравномерность, тем меньше затраты энергии на РТ и тем выше производительность технологии. Это ограничение позволяет задать оптимальную толщину для случая использования моноэнергетических электронов исходя из закона распределения поглощенной дозы в материале. Оптимальная толщина определяется по графику D_{cal} (см. рис. 4.3) из условия равенства доз на передней и задней поверхностях, при этом неравномерность облучения составляет около 20% [4.13].

Однако, как отмечалось выше, НЭП имеют другой вид функции распределения поглощенной дозы в материале (D_{exp} , см. рис. 4.3), для которой нет оптимальной толщины, а ограничение по производительности вступает в противоречие с ограничением

по энергии электронов. Суть противоречия состоит в том, что при увеличении энергии электронов снижается неравномерность облучения и потери энергии при облучении за счет этого. Однако рост энергии электронов ведет к увеличению потерь за счет поглотившихся в изделии электронов, и в системе питания ускорителя при формировании более высокоэнергетичных электронов.

Исходя из сказанного основным ограничением для неравномерности поглощенной дозы в случае НЭП является ограничение по радиационной стойкости облучаемых материалов. При этом эффективная энергия электронов $E_{эф}$ для использования в РТ, которая необходима для того, чтобы неравномерность поглощенной дозы не приводила при облучении к потере потребительских свойств, должна выбираться из соотношения.

$$E_{эф} > 1,2 E_{мин} . \quad (4.2)$$

Таким образом, по формуле (4.2) для облучения рассматриваемых изделий (табл. 4.7) значения $E_{эф}$ должно быть больше 0,33 МэВ.

Другие существенные параметры НУЭ, которые необходимо задать при разработке технологии радиационной стерилизации, – размер пучка и средняя мощность в пучке электронов.

При расчете производительности линии радиационной стерилизации важно получить соответствие между электрическими и дозовыми характеристиками. Размер пучка электронов должен быть не меньше, чем один из размеров облучаемого изделия, в противном случае (при облучении за несколько проходов изделия под пучком) сложно обеспечить равномерность облучения по поверхности.

Зная плотность пучка электронов и длительность импульса, по известной зависимости (формула (6.10), рис. 6.5) находят поглощенную дозу на передней поверхности изделия за импульс. С учетом выбранной неравномерности облучения и $D_{ст}$ находят требуемое количество импульсов, другими словами, средний ток пучка, для стерилизации одного объекта (либо нескольких объектов, либо доли объекта, попадающей одновременно под пучок).

Исходя из заданной программы облучения объектов и сменности работ определяют средний ток пучка в секунду, т.е. мощность. При этом необходимо учитывать, что в пучок передается не более 25% электрической энергии импульса (см. табл. 3.2.).

4.4.4. Методика и результаты дозиметрических измерений

Для проверки результатов, полученных по первым двум шагам методики разработки технологии радиационной стерилизации, на третьем этапе используются натурные испытания, состоящие в облучении изделий с дозиметрическим контролем.

Испытания проводились с использованием частотного наносекундного ускорителя УРТ-0,5 [4.10] (см. главу 1), который работал в режиме однократных импульсов, что позволяло точно контролировать режим облучения и набор поглощенной дозы. В экспериментах использовался режим с МДМ–катодом, расстояние катод–анод составляло 80 мм. Толщина алюминиевой фольги выходного окна была 30 мкм, расстояние от образцов до выходного окна ~ 5 см. Для измерений использовались пленочные детекторы поглощенной дозы СО ПД(Ф)-5(150) (ГСО Госреестр 4447-88) [4.7].

Облучение производилось сначала со стороны бумажного (половина детекторов), затем со стороны полиэтиленового слоя (другая половина детекторов) наружной упаковки изделий, причем половина каждого из детекторов находилась на воздухе вне упаковки. Количество импульсов, необходимое для измерений значения поглощенной дозы, исходя из рабочего диапазона детекторов, различалось и составляло 40-100 импульсов. Разброс значений поглощенной дозы на выходе ускорителя УРТ-0,5 в установленном режиме от импульса к импульсу не превышает 15%.

Для измерения распределения поглощенной дозы использовалось несколько детекторов одновременно в каждом образце. Детекторы в образцах размещались следующим образом.

1. Изделие №1:

- детектор №1, 4 – между слоями В и Г;
- детектор №2, 5 – между слоями Б и В;
- детектор №3, 6 – между слоями А и Б (половина детектора №1 на воздухе).

Все детекторы облучались в течение 40 импульсов.

2. Изделие №2:

- детекторы №1, 6 – между слоями Д и Е;
- детекторы №2, 7 – между слоями Г и Д;
- детекторы №3, 8 – между слоями В и Г;
- детекторы №4, 9 – между слоями Б и В;
- детекторы №5, 10 – между слоями А и Б (половина детектора №10 на воздухе).

Все детекторы облучались в течение 40 импульсов.

3. Изделие №3:

- детекторы №1, 6 – между слоями Д и Е;
- детекторы №2, 7 – между слоями Г и Д;
- детекторы №3, 8 – между слоями В и Г;
- детекторы №4, 9 – между слоями Б и В;
- детекторы №5, 10 – между слоями А и Б (половина детектора №10 на воздухе).

Все детекторы облучались в течение 40 импульсов.

4. Изделие №4:

- детекторы №1, 7 – между слоями Е и Ж;
- детекторы №2, 8 – между слоями Д и Е;
- детекторы №3, 9 – между слоями Г и Д;
- детекторы №4, 10 – между слоями В и Г;
- детекторы №5, 11 – между слоями Б и В;
- детекторы №6, 12 – между слоями А и Б (половина детектора №12 на воздухе).

Детекторы №1-4, 11, 12 облучались в течение 50 импульсов, а детекторы №5 - 10 – 100 импульсов. Результаты дозиметрических измерений приведены в табл. 4.8 и на рис. 4.7-4.10. Значения доз указаны в относительных единицах и значение поглощенной дозы, приведенной к одному импульсу, соответствует относительному значению 1 (на воздухе). Значения, выделенные на рис. 4.7-4.10 курсивом, соответствуют дозам при облучении со стороны полиэтиленового слоя А.

Результаты измерения распределения поглощенной дозы внутри изделий позволяют сформулировать следующие выводы:

- 1) ускоритель УРТ-0,5 обеспечивает возможность радиационной стерилизации всех исследованных изделий;
- 2) наиболее целесообразно облучать изделия со стороны полиэтиленового слоя А;
- 3) изделия с одинарной (изделие №1) и с двойной упаковкой (изделия №№2-4) требуют разных режимов облучения, причем Изделие №4 должно стерилизоваться по особому режиму;

- 4) изделия с двойной упаковкой целесообразно стерилизовать в режиме двухстороннего облучения, причем изделие №4 должно стерилизоваться только в подобном режиме.

Проверка начальной контаминации в лаборатории контроля за биологическим фактором Свердловского областного ЦСЭН не позволила установить точного значения первоначальной биологической загрязненности, в силу низкой чувствительности методики измерений и хорошего соблюдения гигиенических требований при упаковке изделий. Это показало возможность использования для стерилизации пониженного уровня поглощенных доз (12 кГр [4.9]).

Таблица 4.8. Результаты измерений поглощенной дозы

№ детектора	№ иглы			
	5/0	9/0	8/0	0
1	29,0	44,0	45,6	47,0
2	23,8	37,75	38,0	35,57
3	16,2	19,44	17,2	12,9
4	18,36	5,18	4,15	2,5
5	31,0	0,76	1,58	1,25
6	36,0; 39,6	0,065	1,45	1,62
7	-	3,7	3,84	1,4
8	-	10,8	11,4	1,18
9	-	24,33	32,2	1,98
10	-	47,1; 47,06	45,8; 49	7,3
11	-	-	-	33,36
12	-	-	-	51,5; 48,73

Примечание. Значения поглощенных доз приведены к одному импульсу и указаны в кГр, после точки с запятой указаны значения доз на воздухе.

Определение поглощенных доз (для достижения полной стерильности) выполнено для всех типов изделий. Для каждого типа использовались опытные партии по 7 единиц, которые облучались в двух режимах: 100 и 300 импульсами (в режиме ускорителя, описанном в разделе 4.4.3). Изделия облучались со стороны полиэтиленового слоя А (см. раздел 4.4.2). На передней поверхности изделий поглощенная доза составляла около 50 и 150 кГр ($\pm 15\%$), соответственно. Выбор уровня поглощенных доз на передней поверхности изделий сделан исходя из необходимости получения во всем объеме пакетов значения поглощенной дозы, достаточной для полной стерилизации (12 кГр). Расчет распределения абсолютных значений поглощенных доз внутри пакетов приведен в табл. 4.9.

Проверка стерильности образцов осуществлялась по стандартной методике в токсикологическом отделе Свердловского областного ЦСЭН. В выбранном интервале поглощенных доз образцы были стерильны. На основе полученной информации проведено облучение опытной партии изделий (упакованных подобно изделиям 2 и 3). Общим количеством 1160 единиц. Облучение производилось по временной технологии с помощью системы полуавтоматического позиционирования изделий (СПАПИ).

Таблица 4.9. Результаты расчетов поглощенной дозы

Показатель	№ иглы			
	5/0	9/0	8/0	0
Неоднородность облучения, вызванная упаковкой пакета, %	216	1270*	1280*	2500*/500**
Поглощенная доза на поверхности пакета при дозе на внутренней стенке пакета 12 кГр, кГр	2,6	15,3	15,4	30*/6**
Поглощенная доза на внутренней стенке пакета при дозе на поверхности пакета 50 кГр, кГр	2,3	0,39*	0,39*	0,2*/1**
Поглощенная доза на внутренней стенке пакета при дозе на поверхности пакета 150 кГр, кГр	6,9	1,2*	1,2*	0,6*/3**

*Принимается расчетное значение на внутренней поверхности внешнего пакета.

**Для случая двухстороннего облучения в центре пакета.

СПАПИ была смонтирована на ускорителе УРТ-0,5 (см. рис.1.9), при этом применение предварительной ручной укладки изделий на конвейер потребовало соблюдения требований радиационной безопасности персонала. Для решения этой проблемы необходимо было выполнить проход конвейера через биологическую защиту ускорителя. Использование бетонной пробки позволило существенно увеличить степень коллимации излучения, проходящего через наклонный канал (угол наклона 5^0), для конвейера и повысить защищенность персонала. Все зазоры между стенками наклонного канала и конвейером на входе и выходе заложены свинцом толщиной 30 мм с каждой стороны, в том числе между подающей и возвратной лентами конвейера.

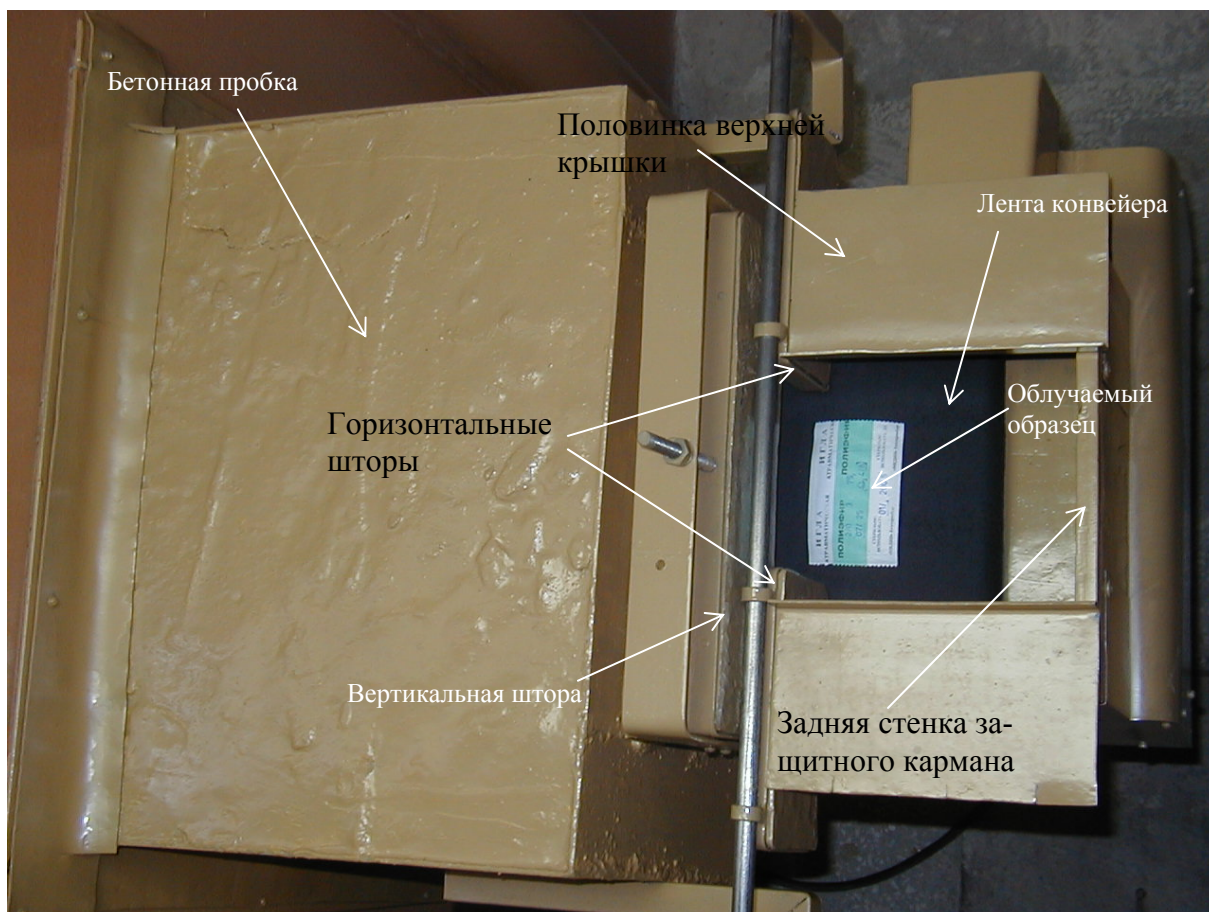


Рис. 4.12. Часть конструкции СПАПИ за защитой (вид сверху)

Кроме того, на входе и выходе наклонного канала (рис. 4.12) были выполнены раздвижные свинцовые шторы (суммарная толщина 40 мм с каждой стороны), одна из которых позволяла регулировать проходное отверстие над подающей лентой конвейера (для облучаемых изделий) по высоте, а вторая пара – по ширине. На загрузочном конце конвейера устроен защитный карман из листового свинца, полностью закрывающий как прямой прострел излучения вдоль наклонного канала (толщина траверса 40 мм), так и подавляющий рассеянное излучение вниз, вбок и вверх (толщина стенок и раздвижной верхней крышки 3 мм). Ускоритель работал на частоте 25 Гц. Скорость движения конвейера составляла 1 см/с, благодаря чему на передней поверхности изделия полученная поглощенная доза 150 кГр ($\pm 15\%$).

Облучение опытной партии позволило получить реальный опыт использования технологии радиационной стерилизации. Сбои в позиционировании изделий, приведшие к переоблучению образцов (13 единиц) или их механическому повреждению (17 единиц), объясняются несохранением формы пакетов после их герметизации и наличием у пакетов язычков для их надрыва. Однако даже эти непредвиденные сложности позволили получить достаточно приемлемый процент потерь изделий по техническим причинам при стерилизации (менее 3 %). Отметим, что к необратимым изменениям ведет только переоблучение образцов.

На основе полученного опыта создан и утвержден в контролирующих органах «Технологический регламент процесса радиационной стерилизации игл атравматических с нитями хирургическими плетеными полиэфирными и полипропиленовыми условных номеров: 1; 0; 2/0; 3/0; 4/0; 5/0; 6/0 с одним или двумя наконечниками с круглыми или трехгранными остриями и игл атравматических с нитями полигликолидными рассасывающимися условных номеров: 4/0; 3/0; 2/0; 0 в полимерной упаковке производства ООО «Медин» на РТУ "Электронный стерилизатор" с импульсно-периодическим ускорителем электронов "УРТ-0,5" Института электрофизики УрО РАН» (рис. 4.13). Несмотря на это, есть смысл отметить, что все изделия целесообразнее стерилизовать в режиме двухстороннего облучения, с использованием вакуумного диода для двухстороннего облучения потому, что это позволит увеличить производительность минимум в два раза при тех же энергозатратах.

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «Медин-Н»

В.Ф. Жданов

2003 г.

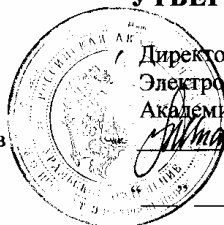


УТВЕРЖДАЮ

Директор Института
Электрофизики УрО РАН
Академик РАН

Г.А. Месяц

2003 г.



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ

процесса радиационной стерилизации

игл атравматических с нитями хирургическими плетеными полиэфирными и полипропиленовыми условных номеров: 1; 0; 2/0; 3/0; 5/0; 6/0 с одним или двумя наконечниками с круглыми или трехгранными остриями и игл атравматических с нитями полигликолидными рассасывающимися условных номеров: 4/0; 3/0; 2/0; 0 в полимерной упаковке производства ООО «Медин-Н» на РТУ «Электронный стерилизатор» с импульсно-периодическим ускорителем электронов «УРТ-0,5» Института электрофизики УрО РАН

ТР – 074 РС- 2003

Срок действия регламента до “_31_” декабря 200 5 г.

СОГЛАСОВАНО

Зам. дир. ЦНИИ-ИБФ
Булдаков
2003г



Екатеринбург 2003г.

Рис. 4.13. Титульный лист Технологического регламента

4.5. Исследование возможности применения НЭП для стерилизации писем

4.5.1. Общие положения

События 2002г. в США (рассылка «белого порошка») показали, что имеется тенденция использования инфекции (патогенных микробов и вирусов) в террористических актах. Применялась тактика заражения почтовых конвертов, но нельзя исключать развития тактических приемов. При этом очевидна направленность использования широко распространенных гражданских каналов связи и транспорта для распространения инфекции, в целях усиления психологического воздействия. Можно прогнозировать и другие подобные каналы, из которых наиболее опасным могут стать бумажные деньги. Все это ставит цель создания эффективных способов противодействия угрозе, из которых одним из важнейших должна стать профилактическая дезинфекция.

Единственный путь решения проблемы профилактической дезинфекции – радиационная стерилизация. При этом наносекундные ускорители электронов наиболее хорошо подходят для решения данной задачи, так как позволяют реализовать стерилизацию на конвейере, при этом они относительно дешевы, требуют недорогой биологической защиты и могут быть установлены в существующих помещениях. Так, для стерилизации конвертов (стандартной массой до 20 г) более чем достаточно энергии электронов 0,5 МэВ, а для стерилизации денег (по одному листу) - даже 0,2 МэВ.

4.5.2. Испытание эффективности НЭП в отношении спорообразующих микроорганизмов

Испытания выполнялись совместно с Центром военно-технических проблем биологической защиты МО РФ, от которого в них принимали участия начальник отдела к.т.н. В.П. Лакомов и в.н.с. д.м.н. профессор В.В. Канишев [4.16].

Испытанию подвергались стандартные почтовые конверты, в которые были вложены пакеты, содержащие споры одного из видов взятых для исследования сухого или жидкого агентного имитатора биологических средств (т.е. содержащего споры авирулентных тест-микроорганизмов, а также повышающие устойчивость их к повреждающим факторам компоненты) или споры агаровой культуры авирулентного сибирезвенного вакцинного штамма СТИ-1:

- сухой агентный имитатор АИС на основе спор *Bacillus subtilis* (штамм 3);
- сухая споровая сибирезвенная вакцина (штамм СТИ-1) с добавлением талька;
- жидкий агентный имитатор АИЖ на основе спор *Bacillus subtilis* (штамм 3);

- агаровая споровая культура *Bacillus anthracis* (штамм СТИ-1).

По устойчивости к спороцидным дезинфицирующим средствам (перекиси водорода, НГК, формальдегиду) все использованные тест-микроорганизмы обладают одинаковой устойчивостью с вирулентным штаммом *Bacillus anthracis*, а споры агаровой культуры *B. anthracis* (штамм СТИ-1) даже более устойчив.

С обеспечением мер, исключающих попадание тест-микроба на наружные поверхности пакета, сухой материал помещали в изготовленные из стандартного листа бумажные и полиэтиленовые пакеты размером 5x5 см, которые затем герметизировали (бумажные пакеты заклеивали с использованием клея ПВА, а полиэтиленовые герметизировали сварным швом). Биологические материалы наносили в пакеты из расчета достижения контаминации их внутренней поверхности порядка $1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^6$ спор*см⁻².

Жидкими материалами (АИЖ и агаровая культура *B. anthracis* (штамм СТИ-1)) контаминировали бязевые тест-объекты размером 1x1 см из расчета обеспечения их обсемененности $1 \cdot 10^2$ и $1 \cdot 10^6$ спор*см⁻². Бязевые тест-объекты после замачивания в споровой суспензии подсушивали в вытяжном шкафу в открытых чашках Петри в течение 30 мин. Затем их помещали в бумажные и полиэтиленовые пакеты (по 2 шт. в каждый пакет), которые затем герметизировали. Кроме того, жидкий материал (АИЖ и споровая культура *B. anthracis* (штамм СТИ-1)) в виде суспензии, содержащей $10 \cdot 10^9$ спор*мл⁻¹, в количестве 0,1 мл помещали в полиэтиленовые пакеты, которые герметизировали сварным швом.

Контаминированные пакеты переносили в бокс с ламинарным потоком и по 2 пакета помещали в почтовые конверты и заклеивали стандартным способом. Конверты размещали на конвейере ускорителя УРТ-0,5 [4.10] и поочередно (с фиксацией под проекцией пучка), подвергали воздействию электронного пучка с заданным количеством импульсов.

В ходе экспериментов поглощенная доза электронного пучка над пакетом, в пакете и под пакетом в конверте измерялась с использованием детектора СО ПД(Ф)-5/150 (ГСО 4447-88), изготовленного НПО "ВНИИФТИ" МНПО "НИОПИК" [4.7]. Облученные конверты помещали в стерильные полиэтиленовые пакеты, которые укладывали в стерильный герметичный ящик. Эффективность обеззараживания содержимого конвертов определяли с обеспечением асептических условий вскрытия конвертов и подготовки проб (пакетов) для бактериологического анализа.

В боксе с ламинарным потоком конверт стерильно вскрывали и стерильным пинцетом извлекали пакеты, каждый из которых после разрезания стерильными нож-

ницами помещали во флакон со стерильной смывной жидкостью, содержащей 0,01 % Твина-80. После встряхивания флакона (флаконов) на шуцельаппарате из них осуществляли посев смывной жидкости (на 5 чашек Петри по 0,2 мл на каждую) с плотной питательной средой, в том числе содержащей 2 % стерильной крови. Посевы на плотной питательной среде инкубировали при температуре 37 С в течение 48 ч и затем проводили их анализ и подсчет выросших колоний.

В целях исключения возможной "перекрестной" контаминации проб в процессе их подготовки и посевах смывной жидкости на питательную среду все операции с конвертами выполняли с учетом дозы их облучения (сначала конверты после максимально испытанной дозы, затем – по убывающей).

Результаты оценки эффективности обеззараживания (в двух повторностях для каждого режима и тест-микроорганизма) содержимого конвертов НЭП ускорителя УРТ-0,5 в отношении спорных форм микробов представлены в табл. 4.10.

Данные экспериментов свидетельствуют о том, что НЭП обладает очень высоким спороцидным действием и начиная с дозы, создаваемой при 50 и более импульсов, обеспечивал инактивацию спор использованных тест-микроорганизмов, которыми контаминированы вкладываемые в конверт пакеты. Неэффективность обеззараживания контаминированных спорами *B. anthracis* (штамм СТИ-1) бязевых тест-объектов, находящихся в бумажных пакетах, при всех уровнях обсемененности, связана с тем, что толщина конверта в данном случае превышала проникающую способность электронного пучка. Это убедительно подтвердили результаты замера поглощенной дозы электронного пучка под пакетом с помощью детектора СО ПД (Ф) -5/150, а также результаты повторного эксперимента, проведенного с обработкой конвертов сначала с одной стороны, а затем такой же дозой – с другой. При таком режиме обработки достигалось эффективное обеззараживание всех использованных тест-микроорганизмов и тест-объектов.

Достаточно простые оценки показывают (табл. 4.11), что при энергии электронов 0,5 МэВ и мощности ускорителя УРТ-0,5 в пучке 1,5 кВт производительность линии достигнет значений, достаточных для обеспечения потребности среднего города. При этом в расчете стоимость ускорителя составляла \$45,000, а все эксплуатационные расходы принимались исходя из реалий России на 2003 г.

Таблица 4.10. Результаты оценки спороцидного действия НЭП

Режим обработки конверта	Тест-микрорганализм	Вид упаковки в конверте	Исходная обсемененность, спор·см ⁻²	Остаточная обсемененность после воздействия электронного пучка (колич. Импульс), спор*см ⁻² :						
				20	50	100	200	300	500	600
С одной стороны	АИС	Бумажный пакет	$(4,5 \pm 0,5) \cdot 10^5$	$\frac{(2,5 \pm 0,6) \cdot 10^2}{3,8^*}$	$\frac{0}{9,5^*}$	$\frac{0}{19,1^*}$	$\frac{0}{38,2^*}$	$\frac{0}{57,3^*}$	$\frac{0}{95,4^*}$	$\frac{0}{114,4^*}$
		Полиэтиленовый пакет	$(3,1 \pm 0,6) \cdot 10^5$	—	—	$\frac{0}{22,3^*}$	$\frac{0}{44,6^*}$	$\frac{0}{66,9^*}$	$\frac{0}{111,4^*}$	$\frac{0}{133,7^*}$
	Сухая вакцина <i>B. anthracis</i> (штамм СТИ-1)	Бумажный пакет	$(5,6 \pm 0,6) \cdot 10^5$	$(3,0 \pm 0,3) \cdot 10^2$	$(2,0 \pm 0,2) \cdot 10^2$	0	0	0	0	—
		Полиэтиленовый пакет	$(5,6 \pm 0,6) \cdot 10^5$	—	—	0	0	0	0	—
	Бязевый тест-объект с агаровой культурой <i>B. anthracis</i> (штамм СТИ-1)	Бумажный пакет	$(1,7 \pm 0,2) \cdot 10^6$	—	—	$\frac{(2,7 \pm 0,1) \cdot 10^2}{9,13^*}$	$\frac{(2,4 \pm 0,2) \cdot 10^2}{18,3^*}$	$\frac{(2,1 \pm 0,5) \cdot 10^2}{27,4^*}$	$(2,5 \pm 0,5) \cdot 10^2$	—
		Бумажный пакет	$(4,4 \pm 0,4) \cdot 10^2$	—	—	$(2,2 \pm 0,3) \cdot 10^2$	$(2,7 \pm 0,5) \cdot 10^2$	$(2,1 \pm 0,2) \cdot 10^2$	$(1,8 \pm 0,3) \cdot 10^2$	—
С двух сторон	Бязевый тест-объект с агаровой культурой <i>B. anthracis</i> (штамм СТИ-1)	Бумажный пакет	$(2,6 \pm 0,3) \cdot 10^5$	—	—	—	0	—	—	0
		Бумажный пакет	$(2,4 \pm 0,1) \cdot 10^2$	—	—	—	0	—	—	0
	АИЖ	Бумажный пакет	$(1,8 \pm 0,4) \cdot 10^6$	—	—	—	0	—	—	0
		Бумажный пакет	$(2,6 \pm 0,4) \cdot 10^2$	—	—	—	0	—	—	0
	Агаровая культура <i>B. anthracis</i> (штамм СТИ-1)	Полиэтиленовый пакет	$(2,0 \pm 0,4) \cdot 10^8$	—	—	—	0	—	—	0
	Сухая вакцина <i>B. anthracis</i> (штамм СТИ-1)	Бумажный пакет	$(4,6 \pm 0,3) \cdot 10^5$	—	0	—	0	—	—	0
Примечание 0 - отсутствие роста колоний на среде; "—" - исследование не проводило; * - поглощенная доза под пакетом, кГр.										

Согласно расчетам с использованием установки УРТ-0,5 можно обеззараживать конверты (пакеты), равноценные по плотности 8 листам бумаги с плотностью 80 г/м² при одностороннем облучении и до 15 листов – при двухстороннем. Для обеззараживания пакетов с большим количеством листов (например, общая тетрадь или брошюра) данная установка может в некоторых случаях использоваться в режиме генератора тормозного рентгеновского излучения. Время перевода установки из режима ускорителя в режим генератора 5 мин. В режиме генератора время набора стерилизующей дозы для обеззараживания таких пакетов будет составлять около 20 мин.

Таблица 4.11. Расчет производительности НЭУ УРТ-0,5 при радиационной стерилизации конвертов

Параметр	Значение
Требуемая для стерилизации поглощенная доза, кГр	25
Размеры облучаемого пакета:	
длина, см	220
ширина, см	110
Энергия электронов, МэВ	0,5
Ширина пучка электронов, см	250
Длина пучка электронов, см	110
Ток пучка электронов, А	500
Длительность импульса на полувывсоте, нс	30
Поверхностная доза за импульс, Гр	500
Частота работы ускорителя, Гц	200
Мощность ускорителя в пучке, кВт	6
Требуемое количество импульсов для набора требуемой дозы, шт.	83
Время набора требуемой дозы, с	0,55
Суммарное время облучения 1 пакета, с	0,55
Требуемая скорость конвейера, см/с	20
Производительность, шт/с	1,8
Производительность, шт/ч (коэффициент загрузки 0,5)	3240
Производительность, шт/смену (за 8 ч)	25 920
Производительность, шт/год (500 смен)	12 960 000
Стоимость обработки, \$USA/шт.	0,003

4.6. Исследование радиационной устойчивости внутренней памяти программируемых цифровых микросхем

В настоящее время для проектирования электронных устройств широко используются программируемые цифровые микросхемы (ПЦМ), в частности микроконтроллеры. ПЦМ позволяют создавать новые устройства путем программирования их внутренней памяти, что проще, быстрее и дешевле обычного пути. Комплект продаваемого программного и аппаратного обеспечения позволяет производить компьютерное моделирование функций как самой ПЦМ, так и создаваемого электронного устройства перед записью программы во внутреннюю память ПЦМ. Однако при этом для ряда применений возникает вопрос радиационной устойчивости внутренней памяти ПЦМ, а также возможности повторного использования ПЦМ. Они достаточно дороги, а в последнее время фирмы-изготовители отказались от применения дорогостоящих окошек над кристаллами ПЦМ, прозрачных для ультрафиолета. Эти окна давали возможность многократного использования ПЦМ путем стирания внутренней памяти ультрафиолетом.

Известно использование радиации, в том числе и тормозного излучения, для контроля качества и модификации свойств микросхем [4.17]. Хорошо изучено воздействие ионизирующего излучения на материалы и конструкцию микросхем оперативной памяти [4.18], однако данных по исследованию радиационной устойчивости внутренней памяти ПЦМ в литературе мы не нашли. Поэтому мы исследовали действие тормозного излучения НУЭ на внутреннюю память ПЦМ.

Эксперименты проводились на микроконтроллерах серии «Z86» фирмы «Zilog» и «87C196KR» фирмы «Intel». Источником излучения служил ускоритель УРТ-0,5 [4.10], в режиме генератора тормозного излучения при частоте работы 50 Гц создающий на расстоянии 0,5 см от мишени, где размещались ПЦМ, среднюю мощность поглощенной дозы 7,64 Гр/мин при максимальной (в импульсе) мощности поглощенной дозы 6,36 кГр/с. Контроль и запись микроконтроллеров производилась: серии «Z86» - на фирменном программаторе-эмуляторе, а «87C196KR» на программаторе «Стерх-710» НПО «БОНД» г. Бердск.

Предварительно оттестированные ПЦМ с записанной тестовой (все единицы) или рабочей программой облучались до полного стирания внутренней памяти. Во время облучения проводился периодический контроль ПЦМ. После облучения ПЦМ исследовались на возможность записи тестовых и рабочих программ с последующей работой в реальном устройстве.

Установлено, что информация во внутренней памяти ПЦМ полностью сохраняется до уровня поглощенных доз, при которых заведомо начинается их выход из строя (более 1000 Гр [4.18]). Однако нами найдено, что стирание информации возможно, когда ПЦМ завернута в алюминиевую фольгу так, что происходит надежное замыкание всех контактов микросхемы между собой. При этом

- полное стирание информации во внутренней памяти всех ПЦМ (использовалось по 10 шт каждого типа) происходило при облучении в течение 50 мин (поглощенная доза около 380 Гр);

- при половинной дозе (от требуемой для полного стирания) основная часть информации стиралась, за исключением нескольких битов, расположенных случайным образом;

- к повторному использованию были годны все ПЦМ после первого стирания, 80 % после второго стирания, 50 % микросхем выдержали четыре цикла.

Полученные результаты значительно отличаются от известных [4.18], где показано, что микропроцессоры 1802, выполненные по технологии КМОП, имели уровень отказа при дозе более 130 Гр. Однако эти микропроцессоры имеют существенно большую толщину подзатворного диэлектрика (увеличение толщины сильно снижает радиационную стойкость микросхем [4.18]), чем исследованные ПЦМ.

Элемент памяти ПЦМ, выполненной по КМОП-технологии (рис.4.14), записывается подачей определенного отрицательного критического напряжения, причем на границе раздела слоев нитрида и диоксида кремния возникает заряд и устанавливается высокий логический уровень «1», а при подаче положительного критического напряжения - низкий логический уровень «0» [4.18].

Таким образом, для стирания ПЦМ необходимо уменьшить величину заряда от логической «1» до логического «0». Механизм рассасывания заряда при облучении может быть как поверхностным, так и объемным. При интенсивности рентгеновского излучения более 10^2 Гр/с, как в нашем случае, плотности инжекционного и объемного токов становятся соизмеримыми $\sim 10^{-7}$ А/см² [4.18].

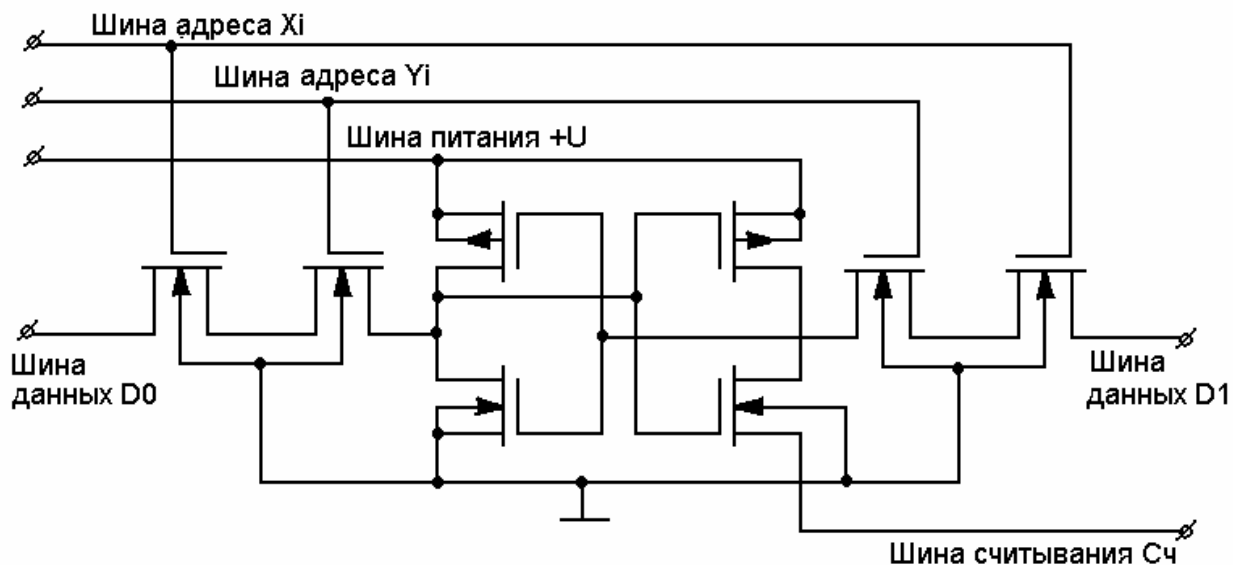


Рис. 4.14. Схема запоминающего элемента КМОП

Подтверждением главной роли токов утечек в снятии заряда является необходимость электрического соединения выводов ПЦМ для стирания информации, так как схема запоминающего элемента на КМОП транзисторах [4.18] предполагает отсутствие соединений между шинами записи, чтения, адреса, питания и земли. А это усложняет путь рассасывания тока без соединения шин между собой.

Однако используемых нами интенсивностей не может быть достаточно (порог 10^6 Гр/с) для развития фотовольтического эффекта, заключающегося в изменении падения напряжения на подзатворном диэлектрике и, следовательно, сдвига порогового напряжения [4.18]. Для проверки механизма стирания выполнено облучение записанных ПЦМ «87С196ЛК» излучением изотопа ^{60}Co при мощности дозы около 0,2 Гр/с. Информация в ПЦМ полностью стиралась при дозе 500 Гр. Это подтверждает отсутствие или очень слабое влияние мощности дозы в диапазоне 0,2–6360 Гр/с.

Таким образом, установлена повышенная чувствительность внутренней памяти ПЦМ, выполненных по технологии КМОП, к ионизирующему излучению при замыкании выводов микросхем между собой. Информация, записанная во внутреннюю память ПЦМ, стирается при поглощенной дозе, которая существенно меньше уровня, при котором сама ПЦМ выходит из строя.

Исходя из полученных данных по возможному количеству циклов стирания ПЦМ можно оценить уровень поглощенных доз, при котором начинается выход исследованных ПЦМ из строя – более 700 Гр.

Полученный эффект запатентован как способ стирания информации [4.19], записанной во внутреннюю память ПЦМ, в целях их повторного использования. Таким образом, возможно использование импульсного тормозного излучения для стирания внутренней памяти ПЦМ. Ускоритель УРТ-0.5 [4.10] позволяет одновременно облучать (с примерно равной дозой) до 30 ПЦМ Z86 или 15 ПЦМ 87C196ЛК. Энергозатраты на радиационное стирание не превышают 3 кВт*ч. При стоимости эксплуатации 1 ч ускорителя около \$15 расчетная стоимость радиационного стирания составит около \$0,5-1 для ПЦМ «Z86» или «87C196ЛК» соответственно. Эта величина в 10-30 раз ниже стоимости ПЦМ и может быть еще существенно уменьшена при рациональном использовании излучения, например при установке ПЦМ в несколько слоев.

4.7. Выводы по главе 4

Таким образом для НУЭ найдено несколько возможных сфер, где их применение технологически и экономически оправдано. Прежде всего полученные данные позволяют с уверенностью говорить не только об эффективности использования НЭП для очистки воды, но и о конкурентоспособности этого метода, в силу комплексности его воздействия. Такие достоинства применения НЭП для очистки воды, как компактность, быстрота обработки, отсутствие расходных компонентов и универсальность, особенно важно в зонах чрезвычайных ситуаций, для использования в которых выполнен расчет мобильной установки.

Полученные результаты показывают, что изменения потребительских свойств меланжа не происходят при поглощенной дозе до 50 кГр, несмотря на то что в составе меланжа находятся легко усваиваемые белки, чувствительные к внешним воздействиям. Это открывает возможность широких исследований по применению НЭП для обработки других пищевых жидкостей. По разработанной технологической схеме можно проводить обработку НЭП не только меланжа, но и других пищевых жидкостей в выбранной бескислородной атмосфере (аргона, углекислого газа или азота), что позволяет уменьшить воздействие продуктов радиолиза воздуха на сырье.

Отработана методика технологии радиационной стерилизации одноразовых медицинских изделий, используя которую можно быстро найти и обосновать требуемые режимы облучения. Получен реальный опыт использования технологии радиационной

стерилизации, отработана система позиционирования изделий под пучком. На основе полученных данных разработан и утвержден технологический регламент процесса радиационной стерилизации.

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что НЭП обладает очень высоким спороцидным действием и обеспечивает инактивацию спор использованных тест-микроорганизмов, которыми контаминированы вкладываемые в конверт пакеты. Это позволяет не только использовать НУЭ для профилактической дезинфекции, но и свести уровень затрат для этого до разумного минимума, что вряд ли возможно в других типах ускорителей.

Установлена повышенная чувствительность внутренней памяти ПЦМ, выполненных по технологии КМОП, к ионизирующему излучению при замыкании выводов микросхем между собой. На основе этих результатов разработана технология радиационного стирания, которая, конечно, не может иметь широкого применения, но позволяет шире взглянуть на возможные области применения НУЭ.

В настоящей главе не нашли отражения вопросы применения НЭП в радиационной химии, рассмотренные в главе 6. Часть из них, связанных с генерацией озона, рассмотрены в главе 5.

Список литературы к главе 4

- 4.1 Орлов В.А. Озонирование воды. М.: Стройиздат, 1984. 186 С.
- 4.2 Санитарная микробиология / Под. ред. С.Я. Любашенко. М.: Пищевая промышленность, 1980. 352 С. (4.12)
- 4.3 Мендел Дж., Мендел Э. Экспериментальная микробиология. М.: Мир, 1967. 347 С.
- 4.4 Соковнин С.Ю., Котов Ю.А., Рукин С.Н., Месяц Г.А. . Исследование действия импульсного частотного электронного пучка на микроорганизмы в водных растворах // Экология. 1996. № 3. С. 222-224.
- 4.5 Справочник по микробиологическим и вирусологическим методам исследования / Под. ред. М.О.Биргера. М.: Медицина, 1982. 357 С.
- 4.6 Kotov Yu.A., Mesyats G.A., S.N. Rukin et. al. Megavolt repetitive high average pulsed power electron beam accelerator RUSLAN, 9th IEEE Pulsed Power Conf., 1994. Albuquerque, New Mexico, USA, Vol.1, P. 151-155.
- 4.7 Генералова В.В., Гурский М.Н. Дозиметрия в радиационной технологии. М.: Изд-во стандартов, 1981. 184 С.
- 4.8 Козлов Ю.Д., Никулин К.И., Титков Ю.С. Расчет и конструирование радиационно-химических установок с ускорителями электронов. М.: Атомиздат, 1976. 184 С.
- 4.9 Туманян М.А., Каушанский Д.А. Радиационная стерилизация. М.: Медицина, 1974. 304 С.
- 4.10 Котов Ю.А., Соковнин С.Ю., Балезин М.Е. Частотный наносекундный ускоритель электронов УРТ-0,5// ПТЭ. 2000. №1. С. 112-115.
- 4.11 Лобзов К.И., Митрофанов Н.С., Хлебников В.И. Переработка мяса птицы и яиц. М.: Агропромиздат, 1987. 240 С.
- 4.12 Kotov Yu.A., Sokovnin S.Yu. and Balezin M.E. A review of possible applications of nanosecond electron beams for sterilization in industrial poultry farming // Trends in Food Science & Technology, 2003, Vol.14, issue 1-2. P. 4-8.
- 4.13 Котов Ю.А., Соковнин С.Ю., Питер А.А., Наконечный В.И.. Способ стерилизации меланжа и устройство для его осуществления // Патент РФ № 2235470. БИ. 2004. №25. С.343.
- 4.14 Васильев Н.В., Горн А.К., Качушкина Г.Г. и др. Использование сильнооточных наносекундных электронных пучков для целей поверхностной стерилизации. ДАН СССР. 1980. Т.253. № 5. С.1120- 1122.
- 4.15 Защита от ионизирующих излучений. Т.1. / Под. ред. Н.Г. Гусева М.: Энергоатомиздат, 1989. 512 с.

- 4.16 Ю.А. Котов, С.Ю. Соковнин В.В. Канищев и др. // Экспериментальная оценка возможности использования наносекундного ускорителя электронов для обеззараживания малогабаритных объектов, контаминированных споровыми формами микробов / Актуальные проблемы дезинфектологии в профилактике инфекционных и паразитарных заболеваний / Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В.И. Вашкова, - Москва: «ИТАР-ТАСС», 2002, с.135-136.
- 4.17 Радиационные методы в твердотельной электронике // В.С. Вавилов, Б.М. Горин, Н.С. Данилин и др. М.: Радио и связь, 1990, 184 С.
- 4.18 Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. М.: Энергоатомиздат, 1988. 256 С.
- 4.19 Котов Ю.А., Соковнин С.Ю., Скотников В.А. Способ стирания внутренней памяти программируемых цифровых микросхем// Патент РФ № 2126998. БИ. 1999. №6. С.461.
- 4.20 Мамаев А.И., Мамаева В.А., Выборнова С.Н. Электрохимическая сильноточная очистка и стерилизация медицинских инструментов в растворах // ДАН. 1996. Т. 346. № 5. С. 610-611.